第 26 卷 第 4 期
2005 年 4 月

半 导 体 学 报
CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS

Vol. 26 No. 4
Apr. ,2005

高温 AlGaInP/GaAs 双异质结双极晶体管*

刘文超 夏冠群 李冰寒 黄文奎

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 利用 Mo/W/Ti/Au 难熔金属作为发射极欧姆接触设计并制作了一种用于功率放大器的新结构 AlGaInP/GaAs 双异质结双极晶体管(DHBT),分析了与传统 AuGeNi 作为接触电极的 AlGaInP/GaAs DHBT 的直流特性差异. 研究结果表明,利用难熔金属作为欧姆接触电极的 DHBT 器件具有较好的高温特性,并进一步分析了其具有良好高温特性的机理.

关键词: AlGaInP/GaAs; 双异质结双极晶体管; Mo/W/Ti/Au; 直流特性

PACC: 2560J; 6430C; 2520D

中图分类号: TN304.2+6 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-4177(2005)04-0756-04

1 引言

异质结双极晶体管(HBT)具有功率密度大[1]、大电流处理能力强[2]、高频性能突出等优点,在微波、毫米波功率[3~5],高速数字电路领域得到了广泛应用.

自四元系 AlGaInP/GaAs HBT 首先由 Houston 于 1991 年报道以来[6],已经引起广泛的关注[7~10]. AlGaInP/GaAs 材料系与传统 HBT 材料系 AlGaAs/GaAs 相比,具有以下优点:

(1) 目前所有与 GaAs 晶格匹配的 III-V族化合物半导体材料中,它具有最大的禁带差,可以提供大的价带不连续(ΔE_V 约从 0.27eV 到 0.62eV),能有效抑制基区空穴的反向注入,改善器件的高温特性.

(2) 四元系 AlGaInP 与 GaAs 腐蚀选择性好,在腐蚀 AlGaInP 到 GaAs 制作发射区台面时,不易出现基区过腐蚀现象,使 AlGaInP/GaAs HBT 器件的制作过程的可重复性和均匀性较好.

(3) 深能级俘获陷阱密度小[9],可提高器件的稳定性.

(4) 表面复合速率小,可降低器件的噪声系数.

预计 AlGaInP/GaAs HBT 将是很有前途的微波功率器件,目前,AlGaInP/GaAs HBT 已成为微波、毫米波功率领域的研究热点.

随着器件尺寸的缩小和芯片集成度的提高,HBT 面临的最大挑战是高温、高功率的应用[11,12]. 高温下器件欧姆接触的退化和失效是制约 HBT 器件应用的主要因素[13~16]. 本论文首次在发射极采用难熔金属系 Mo/W/Ti/Au 作接触金属,在基极的接触金属 Ti/Au 中加入 Pt 作为扩散阻挡层制备出高温 HBT,并对其高温性能进行了研究.

2 实验

本文设计的 AlGaInP/GaAs DHBT 材料由 MOCVD 方法生长,n 型 AlGaInP 层,p^+-GaAs 基区层生长温度分别为 700 ℃,600 ℃. 为了降低欧姆接触的合金化温度,在发射极设计了高掺杂的 $In_xGa_{1-x}As$ "cap"层. DHBT 多层结构材料参数见表 1.

* 国家自然科学基金(批准号:69576035)和上海应用材料研究与发展基金资助项目

刘文超 男,1975 年出生,博士研究生,主要从事化合物半导体高速器件与射频集成电路的研究. Email: wenchaoL@163.com

夏冠群 男,1941 年出生,研究员,博士生导师,主要从事化合物半导体物理与器件的研究.

2004-05-26 收到,2004-09-09 定稿

©2005 中国电子学会

表 1　AlGaInP/GaAs DHBT 多层结构材料参数

Fig. 1　Epitaxial structure of the AlGaInP/GaAs DHBT

Layer	Material	x	y	Thickness / nm	Doping / cm^{-3}
Cap layer	n^+-In_xGa_yAs	0.5	0.5	50	1×10^{19}
	n^+-GaAs			100	5×10^{18}
	n-Ga_yInP		0.52	50	2×10^{18}
	n-Al_xGa_yInP	0.07～0.3	0.22～0.45	20	8×10^{17}
Emitter	n-Al_xGa_yInP	0.3	0.22	250	7×10^{17}
	n-Al_xGa_yInP		0.22～0.45	20	5×10^{17}
Base	p^+-GaAs			80	5×10^{19}
	GaAs			20	undoped
	n-Al_xGa_yInP		0.22～0.45	20	5×10^{17}
Collector	n-Al_xGa_yInP	0.3	0.22	250	7×10^{17}
	n-Al_xGa_yInP	0.07～0.3	0.22～0.45	20	8×10^{17}
	n-Ga_yInP		0.52	50	2×10^{18}
	n^+-GaAs			500	5×10^{18}
Substrate	SI-GaAs				

AlGaInP/GaAs DHBT 采用双台面结构. 如图 1 所示:发射极面积为 50μm ×50μm,发射极被基极包围,边界与基极边界的间距为 10μm;高温 HBT 在发射极利用表面钝化技术和快速合金化技术制备 Mo/W/Ti/Au 难熔金属系欧姆接触,集电极欧姆接触金属采用 AuGeNi/Au,基极欧姆接触金属采用 Ti/Pt/Au. 作为对比,同时制作出发射极和集电极欧姆接触金属均采用 AuGeNi/Au,基极欧姆接触金属采用 Ti/Au 的传统 DHBT. 温度试验均是在标注温度下置于恒温箱中保温 500h 以后的测试数据;AlGaInP/GaAs DHBT 的直流特性使用 HP4145B 晶体管参数分析仪测量.

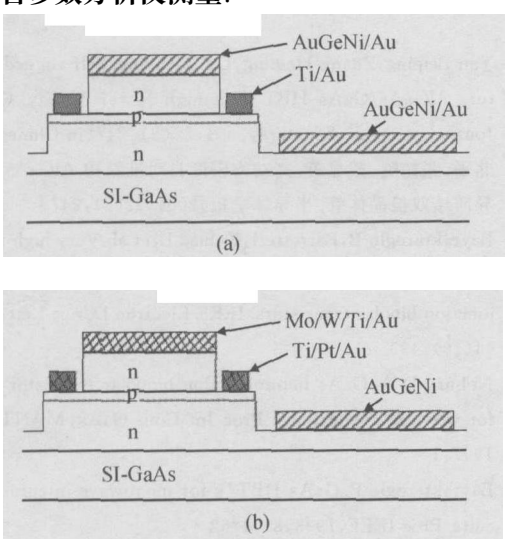

图 1　AlGaInP/GaAs DHBT 的剖面结构图　(a) 传统 DHBT;(b) 高温 DHBT

Fig. 1　Schematic cross section of the studied AlGaInP/GaAs DHBT　(a) Conventional DHBT; (b) High-temperature DHBT

3　结果与讨论

图 2 是采用 AuGeNi 和 Ti/Au 传统接触金属制作的 DHBT 的高温输出特性曲线,基极电流 I_b 以 200μA 的步长增加. 由图可知,在 573 K 时,输出特性保持得较好,与室温下测量的结果几乎没有变化. 当温度升高到 623 K 附近时,I_b 固定,I_c 随 V_{CE} 的增加而增大;同时表现为器件的开启电压 $V_{CE,offset}$ 增大和饱和区过长. 在 673 K 时,I_c 随 V_{CE} 急剧上升,器件失效.

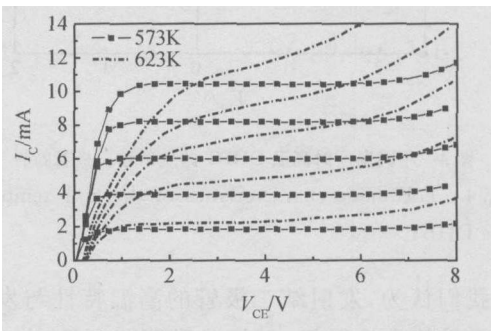

图 2　传统 AlGaInP/GaAs DHBT 的输出特性曲线

Fig. 2　Typical common-emitter current-voltage characteristics of the conventional DHBT

采用难熔金属 Mo/W/Ti/Au 和 Ti/Pt/Au 制作的高温 AlGaInP/GaAs DHBT 在 573,623 以及 673 K 时的输出特性曲线如图 3 所示. 在 573 K 和 623 K 时,器件的输出特性保持得较好,与室温时的输出特性相比没有表现出器件特性恶化的现象. 当温度上升到 673 K 时,器件的开启电压 $V_{CE,offset}$ 有所增大,同时饱和区也比室温时宽,但是器件仍可以作为高温放大器工作. 比较图 2 和图 3 可知,在发射极和基极电极采用难熔金属后,其稳定工作的温度提

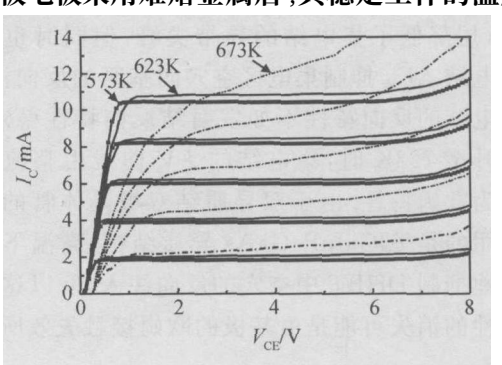

图 3　高温 AlGaInP/GaAs DHBT 的输出特性曲线

Fig. 3　Typical common-emitter current-voltage characteristics of the high-temperature DHBT

高了 50～100 K,最高工作温度可达 673 K.

高温 DHBT 的发射结二极管特性如图 4 所示. 由图可知,在室温到 723 K 的范围内,发射结的反向电压随温度几乎不变,而正向电压随温度的上升略有增加.

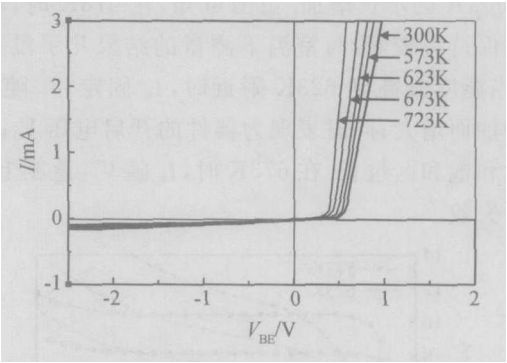

图 4 不同温度时高温 DHBT 的发射结二极管特性

Fig. 4 E-B diode characteristics of the high-temperature DHBT

我们认为,发射结二极管的高温特性与发射结的能带结构和发射极、基极的欧姆接触有关. 首先,高温 HBT 的发射结是 AlGaInP/GaAs 异质结,其 ΔE_V 较大(0.30～0.62eV),所以即使在高温下也能有效地抑制 DHBT 中发射区空穴向基区的反向注入,使其反向电流基本不变. 其次,由于器件的发射极和基极分别采用了难熔金属和具有阻挡层的欧姆接触,所以在高温下发射极串联电阻和基极串联电阻基本上保持不变,这也是发射结高温特性稳定的重要原因.

高温 DHBT 集电结在不同温度时的二极管特性如图 5 所示. 在室温至 673 K 的范围内,集电结的反向电流随温度变化比发射结随温度变化的幅度大;这可能是因为我们在集电结加入的非掺杂 GaAs 层降低了集电结的导带尖峰,但同时也减弱了集电结 ΔE_V 抑制集电区空穴向基区的反向注入,使集电结的反向特性不如发射结反向特性稳定. 当温度升至 723 K 时,集电结的 I-V 曲线由整流特性转变为欧姆特性. 由于双异质结双极晶体管的集电结采用的是 AlGaInP/GaAs 异质结构,高温下也能有效地抑制 DHBT 中空穴的反向注入,所以这种整流特性的消失可能是由基极的欧姆接触失效所致.

4 结论

在发射结采用难熔金属系 Mo/W/Ti/Au 作接

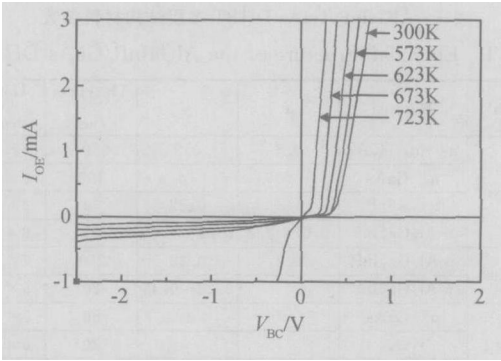

图 5 不同温度时高温 DHBT 的集电结二极管特性

Fig. 5 B-C diode characteristics of the high-temperature DHBT

触金属,在基极的接触金属 Ti/Au 中加入 Pt 作为扩散阻挡层制备出高温 DHBT,并对其高温性能进行了研究. 结果表明,DHBT 可以稳定工作在室温至 673 K 的温度范围内. 通过对 DHBT 器件发射结和集电结二极管特性的分析得出:双异质结双极晶体管的发射结和集电结均采用 AlGaInP/GaAs 异质结构,高温下能有效地抑制 HBT 中空穴的反向注入;器件的欧姆接触采用难熔金属系,从而克服了高温下发射极欧姆接触退化以及基区欧姆接触失效,这也是 HBT 器件具有稳定的高温性能的重要原因.

参考文献

[1] Yan Beiping, Zhang Heming, Dai Xianying. Self-aligned structure AlGaAs/GaAs HBT with high power density. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(2): 247 (in Chinese) [严北平,张鹤鸣,戴显英. 高功率密度自对准结构 AlGaAs/GaAs 异质结双极晶体管. 半导体学报, 2001, 22(2): 247]

[2] Bayraktaroglo B, Barrette J, Kehias L, et al. Very high-power-density CW operation of GaAs/AlGaAs microwave heterojunction bipolar transistors. IEEE Electron Device Lett, 1993, 14(10): 493

[3] Nobury D A. GaAs heterojunction biopolar transistor RF IC for wireless applications. Proc Int Conf GaAs, MANTECH, 1997: 1

[4] Bayrakteroglo B. GaAs HBT's for microwave integrated circuits. Proc IEEE, 1993, 81: 1762

[5] Tanaka S, Amamiya Y, et al. Design considerations for millimeter-wave power HBT's based on gain performance analysis. IEEE Trans Electron Devices, 1998, 45: 36

[6] Yow H K, Houston P A, Sidney C M. High-temperature DC characteristics of AlGaInP/GaAs HBT's grown by MOVPE. IEEE Trans Electron Devices, 1996, 43: 2

[7] Gu Weidong, Xia Guanqun, Feng Xiangen, et al. Study on AlGaInP heterojunction bipolar transistor emitter space-charge-region recombination current. Chinese Journal of Semiconductors, 1997, 18(10): 748 (in Chinese) [顾伟东, 夏冠群, 冯先根, 等. AlGaInP/GaAs HBT 发射结空间电荷区复合电流的研究. 半导体学报, 1997, 18(10), 748]

[8] Wu Jie, Xia Guanqun, Shu Weimin, et al. Analysis of current gain in $Al_{0.3}Ga_{0.22}In_{0.48}P$/GaAs HBT at high temperature. Chinese Journal of Semiconductors, 2000, 21(1): 56 (in Chinese) [吴杰, 夏冠群, 束为民, 等. 高温 AlGaInP/GaAs HBT 的电流增益计算分析. 半导体学报, 2000, 21(1): 56]

[9] Zhang Xinghong, Hu Yusheng, Wu Jie, et al. Influence of deep levels on the performance of AlGaInP/GaAs heterojunction bipolar transistor. Acta Physica Sinica, 1999, 48(3): 556 (in Chinese) [张兴宏, 胡雨生, 吴杰, 等. 深能级对 AlGaInP-GaAs 异质结双极晶体管性能的影响. 物理学报, 1999, 48(3): 556]

[10] Cheng Zhiqun, Sun Xiaowei, Shu Weimin, et al. Heterojuntion bipolar transistor with quarternary AlGaInP alloy emitter. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(5): 425 (in Chinese) [程知群, 孙晓伟, 束为民, 等. 四元系 AlGaInP 为发射极异质结双极晶体管研究. 半导体学报, 1999, 20(5): 425]

[11] Sitch J. HBTs in telecommunications. Solid-State Electron, 1997, 41(10): 1397

[12] Sugahara H, Nagano J, Nittono T, et al. Improved reliability of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors with a strain-relaxed base. IEEE GaAs IC Symp Tech Dig, San Jose (USA), 1989: 115

[13] Di Forte-Poisson M A, Delage S L, Cassete S. GaAs-based materials for heterojunction bipolar transistors reliability results and MMIC applications. Mater Sci Semicond Process, 2001, (4): 503

[14] Pan N, Elliot J, Knowles M, et al. High reliability InGaP/GaAs HBT. IEEE Electron Device Lett, 1998, (19): 115

[15] Low T S, Hutchinson C P, Canfield P C, et al. Migration from an AlGaAs to an InGaP emitter HBT IC process for improved reliability. GaAs IC Symposium, 1998: 153

[16] Di Forte-Poisson M A, Brylinski C, Delage S L, et al. GaInP/GaAs heterojunction bipolar transistors grown by low pressure metalorganic chemical vapor deposition for voltage-controlled oscillators and power amplifier microwave monolithic integrated circuits. Mater Sci Eng B, 1994, 28: 242

A Novel High-Temperature AlGaInP/GaAs Double Heterojunction Bipolar Transistor*

Liu Wenchao, Xia Guanqun, Li Binghan, and Huang Wenkui

(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: A novel AlGaInP/GaAs double heterojunction bipolar transistor (DHBT) is designed and fabricated for power amplifiers. DC characteristics of AlGaInP/GaAs DHBT are studied. We also investigate the difference of DC characteristics between high-temperature DHBT and conventional DHBT. In addition, several electrical factors affecting high-temperature characteristics are discussed in detail.

Key words: AlGaInP/GaAs; double heterojunction bipolar transistors; Mo/W/Ti/Au; DC characteristics

PACC: 2560J; 6430C; 2520D

Article ID: 0253-4177(2005)04-0756-04

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 69576035) and Shanghai Research and Development Project of Application Materials

Liu Wenchao male, was born in 1975, PhD candidate. He is mainly engaged in research on high-speed compound semiconductor devices and RF integrated circuits.

Xia Guanqun male, was born in 1941, professor. He is mainly engaged in research on compound semiconductor physics and devices.

Received 26 May 2004, revised manuscript received 9 September 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics