

InP 基及含磷化合物 HBT 材料的 GSMBE 生长与特性*

齐 鸣[†] 徐安怀 艾立鹏 孙 浩 朱福英

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

摘要: 通过对外延材料结构设计和 GSMBE 生长工艺的深入研究, 解决了生长 InP 基及含磷化合物 HBT 外延材料的关键问题, 建立了稳定优化的 GSMBE 生长工艺, 研制出性能优良的 $\phi 50\text{mm}$ InP 基 HBT 和 $\phi 100\text{mm}$ InGaP/GaAs HBT 外延材料. 所发展的 GSMBE 外延技术, 在 As/P 气氛切换、基区 p 型重掺杂扩散抑制、双异质结 HBT 结构设计等方面具有自己的特色. 器件单位采用所提供的外延材料研制出的 InP 基 HBT 和 InGaP/GaAs HBT 器件与电路, 达到了目前采用国产 HBT 外延材料研制的最好水平.

关键词: InP; InGaP; GaAs; GSMBE; HBT

PACC: 6855; 7340L; 7360L

中图分类号: TN304.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0182-04

1 引言

异质结双极晶体管(HBT)是目前最主要的微波、毫米波器件之一, 具有超高速、低噪声、高功率、高线性等特点, 在光纤通信、无线通信、电子对抗、精确制导、雷达系统等电子系统中具有重要的应用. InP 基及含磷化合物 HBT 是当前 HBT 的主要材料体系, 其中含磷化合物 InGaP/GaAs HBT 是微波功率 HBT 器件与电路的主要材料, 而 InP 基 HBT 则是毫米波 HBT 器件与电路的首选材料体系^[1~6].

研制 HBT 器件与电路的关键技术之一, 就是超薄层外延材料技术. 本工作通过对外延材料结构设计和气态源分子束外延(GSMBE)生长工艺的深入研究, 解决了 GSMBE 生长 InP 基及含磷化合物 HBT 外延材料的一系列关键问题, 建立了稳定优化的 GSMBE 外延材料生长工艺, 研制出性能优良的 $\phi 50\text{mm}$ InP 基 HBT 和 $\phi 100\text{mm}$ InGaP/GaAs HBT 外延材料. 国内有关器件单位采用所提供的外延材料研制出的 InP 基 HBT 和 InGaP/GaAs HBT 器件与电路, 达到了目前采用国产 HBT 外延材料研制的最好水平.

2 材料生长与表征

本工作所用的外延生长设备为英国 VG 公司

的 V90 型 GSMBE 系统. 采用高纯金属镓(Ga)和铟(In)作为 III 族束源; 由高纯砷烷(AsH_3)和磷烷(PH_3)裂解后得到的 As_2 和 P_2 分别用作砷源和磷源, 束流强度由气体管道中的压力来控制, 裂解温度为 1040°C . 采用硅(Si)作为 n 型杂质源, 分别用铍(Be)或四溴化碳(CBr_4)作为 p 型杂质源, 后者的束流强度也由气体管道中的压力控制. 外延衬底分别为(001)Si-InP 和(001)Si-GaAs 单晶片.

分别采用 X 射线衍射(XRD)、原子力显微镜(AFM)、霍尔测量(Hall)、电化学 CV(ECV)、光致发光谱(PL)、二次离子质谱(SIMS)等方法对所得外延材料的组份、厚度、载流子浓度和迁移率、表面形貌、光学特性等进行测量和表征.

3 结果与讨论

3.1 外延材料生长及其特性

生长高质量 InP 基及含磷化合物 HBT 外延材料需要解决的关键问题包括: (1)外延层组份、晶格失配度、厚度、掺杂浓度等的精确控制; (2)大面积组份和掺杂的均匀外延生长; (3)分别含有两种 V 族元素的异质结构材料的界面质量控制; (4)基区高浓度 p 型掺杂及其扩散抑制等. 本工作通过大量的生长实验, 优化了衬底表面处理、生长温度、生长速率、分子束强度 V/III 比等 GSMBE 生长条件和工艺,

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号:2002CB311902)

[†] 通信作者. Email: mqi@mail.sim.ac.cn

2006-11-21 收到, 2006-12-13 定稿

实现了对 InGaAs、InGaP、InP 和 GaAs 等外延层组份、厚度、掺杂及其电学特性的精确控制。为了实现尽可能理想的晶格匹配,通过调节 In/Ga 束流比等生长参数,使 InGaAs/InP 和 InGaP/GaAs 异质结构材料的晶格失配度 $\Delta a/a$ 可控制在 10^{-4} 数量级(图 1,2)。对于在 GaAs 上生长高含 In 大失配的 InGaAs 盖顶层,通过优化生长过程中的衬底温度、生长速率和束流强度等工艺条件,所生长的 InGaAs/GaAs 异质结构的失配度 $\Delta a/a$ 可达到 $>3 \times 10^{-3}$, In 组份递变层的厚度仅为 50nm。

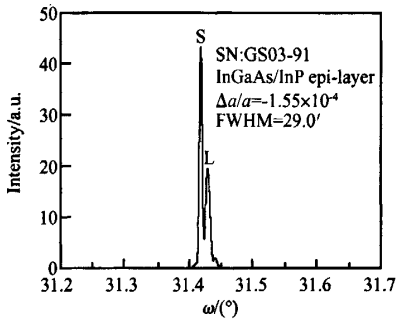


图 1 InGaAs/InP 外延层的 XRD 测量结果
Fig. 1 XRD pattern of InGaAs/InP epi-layer

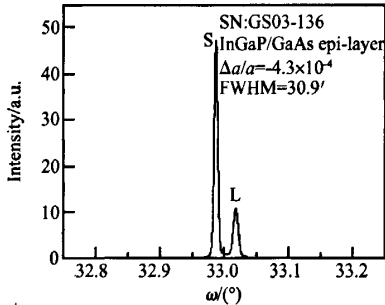


图 2 InGaP/GaAs 外延层的 XRD 测量结果
Fig. 2 XRD pattern of InGaP/GaAs epi-layer

大面积均匀是外延材料能够实现实用化的重要前提。为了提高 $\phi 50\text{mm} \sim \phi 100\text{mm}$ 外延材料组分和掺杂浓度的大面积均匀性,通过优化 GSMBE 系统配置和生长温度、生长速率、转动速率等外延生长条件,使所生长的 $\phi 50\text{mm}$ InGaAs/InP 和 $\phi 100\text{mm}$ InGaP/GaAs 外延材料的组分及掺杂浓度的不均匀性均达到了 $< \pm 1\%$ (图 3,4)。

对于分别含有两种或两种以上不同 V 族元素的异质结构材料,由于 V 族束源切换过程中易出现记忆效应而导致界面原子混融,使异质结构界面不清晰,形成不希望出现的多元化合物,使器件特性受到很大影响,也给器件工艺带来困难。经过对 As/P 束源切换时出现记忆效应的程度及其对异质结构界

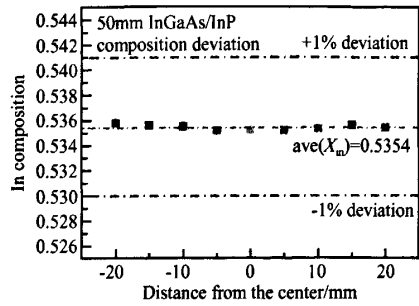


图 3 $\phi 50\text{mm}$ InGaAs/InP 外延材料的组分均匀性
Fig. 3 Uniformity of $\phi 50\text{mm}$ InGaAs/InP epi-layer

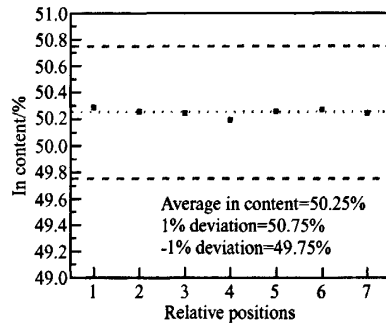


图 4 $\phi 100\text{mm}$ InGaP/GaAs 外延材料的组分均匀性
Fig. 4 Uniformity of $\phi 100\text{mm}$ InGaP/GaAs epi-layer

面质量影响的分析和实验,通过优化 As 和 P 等 V 族束源的交替和开关时间,建立了有特色的 GSMBE 异质结构生长 As/P 束源切换工艺,有效抑制了记忆效应,保证了异质结构外延材料的界面质量,取得了很好的效果。

HBT 最大的特点之一就是采用重掺杂基区结构,因此也极易产生高浓度 p 型杂质向发射区和集电区的扩散,从而导致 p-n 结与异质结的偏位,使器件性能大大下降。如何获得高浓度 p 型掺杂并防止其向发射区和集电区的扩散,是 HBT 外延材料生长过程中需要解决的关键问题之一。本工作分别采用 Be 和 CBr_4 作为 p 型杂质源,通过优化外延过程中的衬底温度、分子束强度 V/III 比、生长间隔时间等外延条件,成功生长出空穴浓度大于 $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 的超高浓度掺杂 p 型 InGaAs 和 GaAs 基区材料,并具有良好的电学特性(图 5,6)。

3.2 HBT 器件结构材料及其特性

在解决了外延材料 GSMBE 生长关键技术的基础上,根据对 HBT 材料能带结构的分析,结合器件应用背景和研制工艺的要求,设计和生长出多种 InP 基和含磷化合物 HBT 器件结构外延材料,包括超高速 InGaAs/InP 单异质结 HBT(SHBT)结构材

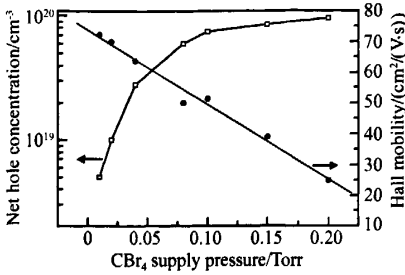


图 5 掺碳 p 型 InGaAs 空穴浓度和迁移率随 CBr₄ 压力的变化

Fig. 5 Dependence of hole concentration and mobility of C-doped p-InGaAs on CBr₄ supply pressure

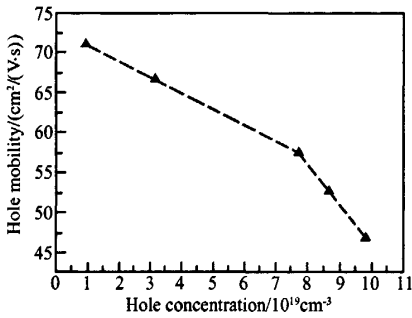


图 6 p 型 InGaAs 空穴迁移率随浓度的变化

Fig. 6 Dependence of hole mobility on hole concentration of p-InGaAs

料、InP/InGaAs/InP 双异质结 HBT (DHBT) 结构材料和功率器件与电路用 InGaP/GaAs HBT 结构材料(图 7). 特别是对于功率器件与电路用 InGaP/GaAs HBT 材料, 根据功率器件对集电结击穿电压的特殊要求, 对外延材料基区厚度和集电区掺杂浓度与厚度等参数进行了优化, 从而有效提高了器件的输出功率. 而对于 InP/InGaAs/InP DHBT 结构, 由于在集电结处导带不连续而形成的势垒尖峰所产生的电流阻挡效应, 将大大影响 DHBT 器件的性能. 为了解决这个问题, 获得性能良好的 DHBT

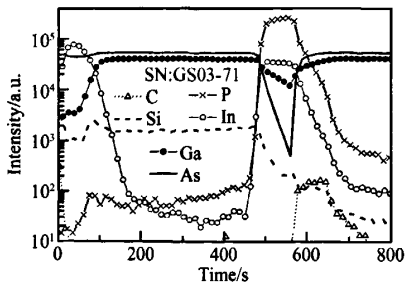


图 7 InGaP/GaAs HBT 外延材料的 SIMS 分析结果

Fig. 7 SIMS profiles of InGaP/GaAs HBT structure

器件, 设计和采用了在集电区和基区之间插入一个高掺杂 n⁺-InP 层构成复合集电区的结构. 通过对这种 DHBT 能带结构的分析和利用基于热场发射和连续性方程的发射透射模型的理论计算, 证明所引入的 n⁺-InP 层可显著降低集电结处由于导带不连续而形成的势垒尖峰, 从而克服电流阻挡效应. 器件测试结果表明, 所设计的 DHBT 材料结构能有效降低集电结的导带势垒尖峰, 显著改善了器件的输出特性(图 8).

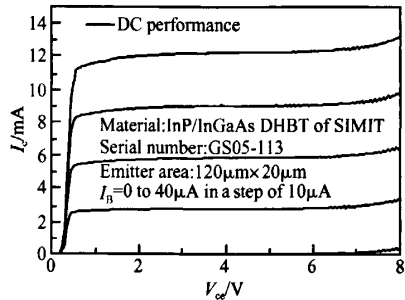


图 8 InP/InGaAs/InP DHBT 器件的输出特性

Fig. 8 DC characteristics of InP/InGaAs/InP DHBT

中国科学院微电子研究所采用本工作生长的外延材料, 分别研制出最大直流增益 $\beta = 120$ 、截止频率 $f_T = 162\text{GHz}$ 、击穿电压 $BV_{\infty} = 3.8\text{V}$ 的 InGaAs/InP SHBT 器件和 $\beta > 300$ 、 $f_T = 80\text{GHz}$ 、 $BV_{\infty} = 8\text{V}$ 的 InP/InGaAs/InP DHBT 器件, $\beta > 50$ 、 $f_T = 90\text{GHz}$ 、 $BV_{\infty} > 12\text{V}$ 的 InGaP/GaAs HBT 高速器件和 $\beta > 70$ 、 $f_T = 43\text{GHz}$ 、 5.4GHz 下输出功率为 30.6dBm 、附加效率达到 38% 、相应的功率增益为 6.3dB 的 InGaP/GaAs HBT 功率器件, 以及 C-X 波段 InGaP/GaAs HBT 功率放大器电路和传输速率大于 10Gbps 的激光驱动器电路. 这些 InP 基及含磷化合物 HBT 器件和电路的研制结果, 均达到了目前采用国产外延材料研制的最好水平.

4 结论

本工作通过对外延材料结构设计和 GSMBE 生长工艺的深入研究, 解决了 GSMBE 生长 InP 基及含磷化合物 HBT 外延材料的关键问题, 建立了优化的 GSMBE 外延材料生长工艺, 研制出性能优良的 $\phi 50\text{mm}$ InP 基 HBT 和 $\phi 100\text{mm}$ InGaP/GaAs HBT 外延材料. 所发展的 InP 基及含磷化合物 HBT 材料 GSMBE 生长技术, 不仅吸取了国内外已有的经验, 而且在 As/P 气氛切换工艺、基区 p 型重掺杂扩散抑制、InP 基双异质结 HBT 结构设计等关键技术具有自己的特色. 国内有关器件单位采用所提供的外延材料研制出的 InP 基 HBT 和 In-

GaP/GaAs HBT 器件与电路,达到了目前采用国产 HBT 外延材料研制的最好水平。

致谢 感谢中国科学院微电子研究所刘新宇教授、刘训春教授、钱鹤教授、苏树兵博士和申华军博士在材料设计优化和器件研制方面的大力合作。

参考文献

- [1] Liu W. Handbook of heterojunction bipolar transistor. John Wiley & Sons, 1998
- [2] Houston P A. High-frequency heterojunction bipolar transistor device design and technology. Electronics & Communication Engineering Journal, 2000, 10: 220
- [3] Bayraktaroglu B, Khatibzadeh M A, Hudgens R D. Monolithic X-band heterojunction bipolar transistor power amplifiers. GaAs IC Symposium, 1989; 271
- [4] Oka T, Hirata K, Suzuki H, et al. High-speed small-scale InGaP/GaAs HBT technology and its application to integrated circuits. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(11): 2625
- [5] Yamamoto K, Suzuki S, Ogawa N, et al. InGaP/GaAs HBT MMICs for 5GHz-band wireless applications. IEEE MTT-S Digest, 2004; 551
- [6] Griffith Z, YoungMin Kim, Dahlstrom M, et al. InGaAs/InP metamorphic DHBTs grown on GaAs with lattice-matched device performance and $f_T, f_{max} > 268\text{GHz}$. IEEE Electron Device Lett, 2004, 25(10): 675

Growth and Characterization of InP-Based and Phosphorous-Involved HBT Materials by GSMBE*

Qi Ming[†], Xu Anhuai, Ai Likun, Sun Hao, and Zhu Fuying

(State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: Growth and characterization of InP-based and phosphorous-involved materials for applications to HBTs by GSMBE were studied systematically. High quality 50mm InP-based HBT and 100mm InGaP/GaAs HBT epitaxial materials were obtained through optimizing the HBT structure design and the GSMBE growth condition. It is shown that the HBT devices and circuits with high performance can be achieved by using the epi-wafers grown by the GSMBE technology developed in this work.

Key words: InP; InGaP; GaAs; GSMBE; HBT

PACC: 6855; 7340L; 7360L

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0182-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2002CB311902)

[†] Corresponding author. Email: mqi@mail.sim.ac.cn

Received 21 November 2006, revised manuscript received 13 December 2006