

MBE 生长的高质量 AlGaAs/InGaAs 双掺杂 PHEMT 结构的材料*

曹 昕 曾一平 孔梅影 王保强 潘 量 张昉昉 朱战萍

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 用 MBE 方法制备的 PHEMT 微结构材料, 其 2DEG 浓度随材料结构的不同在 $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 之间, 室温霍耳迁移率在 $5000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。制备的 PHEMT 器件, 栅长为 $0.7 \mu\text{m}$ 的器件的直流特性: $I_{ds} \sim 280 \text{ mA/mm}$, $I_{max} \sim 520 \text{--} 580 \text{ mA/mm}$, $g_m \sim 320 \text{--} 400 \text{ mS/mm}$, $BV_{DS} > 15 \text{ V}$ ($I_{DS} = 1 \text{ mA/mm}$), $BV_{GS} > 10 \text{ V}$, 微波特性: $P_0 \sim 600 \text{--} 900 \text{ mW/mm}$, $G \sim 6 \text{--} 10 \text{ dB}$, $\eta_{add} \sim 40 \text{--} 60\%$; 栅长为 $0.4 \mu\text{m}$ 的器件的直流特性: $I_{max} \sim 800 \text{ mA/mm}$, $g_m > 400 \text{ mS/mm}$.

关键词: PHEMT; MBE; AlGaAs/InGaAs

PACC: 6855; 6865; 7340L

中图分类号: TN 304.54 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)09-0934-03

High Quality AlGaAs/InGaAs Double Doped Pseudomorphic HEMTs Grown by MBE*

CAO Xin, ZENG Yi-ping, KONG Mei-ying, WANG Bao-qiang, PAN Liang,
ZHANG Fang-fang and ZHU Zhan-ping

(New Material Department, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100083, China)

Received 6 June 2000

Abstract: High quality AlGaAs/InGaAs double δ doped pseudomorphic HEMTs have been grown by MBE. The 2DEG density of the material is ranged from $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ to $4.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ and room temperature Hall mobility ranged from $5000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ to $6500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ with the difference of the material structure. The D. C. characteristics of the PHEMT device with gate length of $0.7 \mu\text{m}$ are: I_{ds}

* “九五”国家重点科技攻关项目 97-770-01-01 支持课题[Project Supported by National Key Science and Technology Project in “9th Five Year Plan” Program of China (No. 97-770-01-01)].

曹 昕 男, 博士后, 从事化合物半导体微电子材料与器件的研究。

曾一平 男, 研究员, 博士生导师, 从事 MBE 技术和化合物半导体材料的研究。

孔梅影 女, 研究员, 博士生导师, 从事 MBE 技术和化合物半导体材料的研究。

2000-06-06 收到

$\sim 280\text{mA/mm}$, $I_{\text{max}} \sim 520\text{--}580\text{mA/mm}$, $g_m \sim 320\text{--}400\text{mS/mm}$, $BV_{\text{DS}} > 15\text{V}$ ($I_{\text{DS}} = 1\text{mA/mm}$), $BV_{\text{GS}} > 10\text{V}$ and the R. F. characteristics are: $P_0 \sim 600\text{--}900\text{mW/mm}$, $G \sim 6\text{--}10\text{dB}$, $h_{\text{add}} \sim 40\text{--}60\%$. The D. C. characteristics of the PHEMT device with gate length of $0.4\mu\text{m}$ are: $I_{\text{max}} \sim 800\text{mA/mm}$, $g_m > 400\text{mS/mm}$.

Key words: PHEMT; MBE; AlGaAs; InGaAs

PACC: 6855; 6865; 7340L

Article ID: 0253-4177(2000)09-0934-03

1 引言

双 δ AlGaAs/InGaAs PHEMT 器件由于其高功率、高效率、优良的线形、能在较大的电压范围内正常工作等特点,被广泛用于相控阵雷达、卫星通讯、无线本地环(LAN)、个人通讯系统(PCS)等等。特别是它在毫米波高端有良好的功率和效率的特性,使其成为毫米波高端应用的主流器件^[1]。优良的PHEMT功率器件需要优良的材料。AlGaAs/InGaAs 双 δ 掺杂 PHEMT 结构材料的生长有几个难点。首先,材料在进行了硅 δ 掺杂后的生长过程中,硅要扩散、分凝,难以形成分布陡峭的掺杂^[2]。其次,为了提高沟道迁移率,要求异质结界面突变,且单原子层平整,这也是较难达到的。还有,优良器件要求材料有较高的二维电子气(2DEG)密度和较高的载流子迁移率,而提高二维电子气(2DEG)密度和提高载流子迁移率往往相矛盾,使得材料结构设计时难以在二者之间折衷^[3]。作为实用化的材料,对大面积均匀性、表面缺陷密度等指标也有较高的要求。

本文考虑了以上难点,进行了结构设计优化和工艺优化,用MBE方法制备的双 δ AlGaAs/InGaAs PHEMT 结构材料,其2DEG浓度随材料结构的不同在 $2.0\text{--}4.0 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ 之间,室温霍耳迁移率在 $5000\text{--}6500\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,达到了国内领先、国际先进水平。除了制备出特性优良的材料外,已通过与器件单位的合作,制备出特性优良的器件。

2 材料生长及特性

材料的制备采用EPI公司的GEN II型分子束外延设备,采用AXT公司的半绝缘GaAs(100)衬底。材料的结构见表1。为了制备优良的双 δ 掺杂AlGaAs/InGaAs PHEMT结构材料,主要解决了材料生长中的以下难题。首先,通过控制生长时衬底的温度,并采用三个单原子层的低温生长的AlGaAs作阻挡层,解决了硅 δ 掺杂后扩散、分凝的问题,形成了分布陡峭的掺杂。在InGaAs沟道生长工艺中,采取了生长前预铺一个单原子层的In的方法,解决了InGaAs沟道中In分凝的问题;采取了界面生长停顿、生长GaAs单原子层平整界面等技术,解决了异质结界面的突变和单原子层平整。通过研究材料质量与器件特性之间的关系发现,影响器件特性的一个关键性因素是外延层中电子从硅 δ 掺杂层转移到沟道中的效率。如果转移效率低,没有转移到沟道的电子将在硅 δ 掺杂层中形成一个屏蔽层。这样的材料制备成器件后,屏蔽层将影响栅电极对沟道的控制能力,从而影响器件的跨导等特性。因此,在优化材料结构时,我们以提高电子的转移效率为主要优化目标,用PL谱方法作为判断电子的转移效率的辅助判据。对隔离层(spacer)厚度、掺杂浓度及沟道结构进行了优化。最后,通过迁移率谱方法对外延层进行研究,解决了如何在2DEG密度和载流子迁移

表1 双AlGaAs/InGaAs PHEMT材料的结构

Table 1 Structure of Double Doped AlGaAs/InGaAs

PHEMT Material

结构	厚度/nm	掺杂浓度
GaAs	50	$2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$
Al _{0.22} Ga _{0.78} As	35	
δ -Si		$4 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$
Al _{0.22} Ga _{0.78} As Spacer	2—4	
In _{0.2} Ga _{0.8} As	12—14	
Al _{0.22} Ga _{0.78} As Spacer	2—4	
δ -Si		$1 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$
Al _{0.22} Ga _{0.78} As	50	
GaAs-Buffer	40	
GaAs/Al _{0.22} Ga _{0.78} As SL		
SI-GaAs		

率二者之间折衷的问题。

为了使材料达到实用化,还对材料大面积均匀性、表面缺陷密度等指标进行了重点研究。

材料特性的测量结果见表 2。材料的迁移率和 2DEG 密度通过霍耳(Hall) 测量得到,材料的均匀性通过 X 射线双晶衍射和 PL mapping 方法测量得到。为了表明材料质量,在表 2 中,还将材料指标与处于国际最先进水平之一的美国 QED 公司 1999 年在互联网上公布的产品指标进行了对比。比较中可见,我们的材料的质量已达到世界先进水平。

表 2 PHEMT 结构材料的参数与国际先进水平的比较

Table 2 Specification Parameters Comparison of PHEMT Epitaxy Wafer Between Our Result and Comp. QED

	室温迁移率 $(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	载流子浓度 $/10^{12} \text{cm}^{-2}$	材料不均匀性 $\leq \pm 1.5\%$	表面缺陷 $/(个 \cdot \text{cm}^{-2})$
美国 QED 公司	5000—6500	2.0—3.6	$\leq \pm 1.5\%$	≤ 20
中国科学院半导体研究所	5000—6500	2.0—4.0	$\leq \pm 1.5\%$	≤ 100 个

3 器件应用结果

通过与信息产业部电子 55 所合作,研制了栅长为 $0.7\mu\text{m}$ 的功率 PHEMT 器件,通过与信息产业部电子 13 所合作,研制了栅长为 $0.4\mu\text{m}$ 的器件。表 3 中,将这两种器件的直流特性与国际同类器件的报道结果进行了比较。显然,这两种器件的水平都达到了国际先进。栅长为 $0.7\mu\text{m}$ 的器件还得到了优良的微波特性: $P_0 \sim 600—900\text{mW/mm}$, $G \sim 6—10\text{dB}$, $h_{\text{add}} \sim 40—60\%$, 这是目前国内报道的最好结果。

表 3 双 PHEMT 结构材料应用结果与国际先进水平的比较

Table 3 Application Comparison of Double Doped PHEMT Between Our Material and Advanced Material in the World

器件研制单位	栅长/ μm	$g_m / (\text{mS} \cdot \text{mm}^{-1})$	$I_{\text{dss}} / (\text{mA} \cdot \text{mm}^{-1})$	$I_{\text{max}} / (\text{mA} \cdot \text{mm}^{-1})$	公布日期
NEC1	0.45	370	270	550	1995
NEC2	0.45	400	240	510	1996
Sony3	0.8	420	—	400	1999
电子 13 所	0.4	> 400	—	800	1999
电子 55 所	0.7—0.8	320—400	280	520—580	1999

4 结论

本文用 MBE 方法制备的 PHEMT 微结构材料,其 2DEG 浓度随材料结构的不同在 $2.0—4.0 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 之间,室温霍耳迁移率在 $5000—6500 \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,达到了国内领先、国际先进水平。通过与器件单位合作,已制备出特性优良的器件。制备的功率 PHEMT 器件,栅长为 $0.7\mu\text{m}$ 的直流特性: $I_{\text{dss}} \sim 280\text{mA/mm}$, $I_{\text{max}} \sim 520—580\text{mA/mm}$, $g_m \sim 320—400\text{mS/mm}$, $BV_{\text{DS}} > 15\text{V}$ ($I_{\text{DS}} = 1\text{mA/mm}$), $BV_{\text{GS}} > 10\text{V}$, 微波特性: $P_0 \sim 600—900\text{mW/mm}$, $G \sim 6—10\text{dB}$, $h_{\text{add}} \sim 40—60\%$; 栅长为 0.4mm 的器件直流特性: $I_{\text{max}} \sim 800\text{mA/mm}$, $g_m > 400\text{mS/mm}$ 。这是目前国内报道的最好结果,与世界先进水平也比较接近。

参 考 文 献

- [1] J. V. Pilorenzo, B. Lauterwasser, M. P. Zaitlin, J. Crystal Growth, 1997, **175/176**: 1—7.
- [2] M. C. Holland, E. Skuras, J. H. Davies *et al.*, J. Crystal Growth, 1995, **150**: 1215—1219.
- [3] J. L. Pearson, M. C. Holland, C. R. Stanley *et al.*, J. Crystal Growth, 1999, **201/202**: 757—760.
- [4] K. Matsunaga, Y. Okamoto, M. Kazuhara, IEEE MTT-S Digest, 1995, 335—338.
- [5] K. Matsunaga, Y. Okamoto, I. Miura *et al.*, IEEE MTT-S Digest, 1996, 697—700.
- [6] N. Nakamura, S. Wada, H. Kawasaki, Electronic Letters, 1999, **35**: 336—338.