

# 三种纵向结构的 AlGaIn/GaN HFET 性能比较

吕长志<sup>1</sup> 冯士维<sup>1</sup> 王东风<sup>1</sup> 张小玲<sup>1</sup> 谢雪松<sup>1</sup> 何焱<sup>1</sup> 张浩<sup>1</sup>  
徐立国<sup>1</sup> 袁明文<sup>2</sup> 李效白<sup>2</sup> 曾庆明<sup>2</sup>

(1 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)  
(2 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要: 对 AlGaIn/GaN HFET 纵向的常规结构、倒置结构和双异质结进行了研究, 结果表明: 常规结构的材料生长简单、容易控制, 倒置结构的直流性能低于常规结构, 而双异质结虽然在材料生长方面较为复杂, 但它可以获得较常规结构更为优良的直流特性。

关键词: AlGaIn/GaN; HFET; 倒置结构; 双异质结  
PACC: 7340N

中图分类号: TN325 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0155-03

## 1 引言

由于氮化镓(GaN)具有很高的电子峰值饱和速度( $V_{sat} = 2 \times 10^7$  cm/s), 很高的击穿电场( $E_c = 3.5 \times 10^6$  V/cm)和良好的热导率( $\kappa = 1.3$  W/(K · cm)), 使它成为高频大功率电子器件颇具吸引力的材料<sup>[1]</sup>。

GaN 材料的宽带隙( $E_g = 3.4$  eV), 使它具有很低的本征载流子浓度, 因而可以在很宽的温度范围内精确地控制自由载流子的浓度, 从而获得性能良好的高温半导体器件<sup>[2,3]</sup>。

自从 1993 年第一只 GaN FET 诞生<sup>[4]</sup> 以来的 10 年间, 其性能获得了日新月异的提高<sup>[5]</sup>, 而国内在此方面的研究虽然起步较晚, 也取得了很多有价值的研究成果<sup>[6~8]</sup>。

本文使用反应分子束外延(RMBE)设备完成了三种纵向结构的 AlGaIn/GaN HFET 材料的生长, 采用相同的光刻版图和相近工艺条件对三种纵向结构器件的制造, 并介绍三种器件直流特性的测试结果及分析。

## 2 三种纵向结构的 AlGaIn/GaN HFET 的设计与制造

设计的三种 AlGaIn/GaN HFET 的结构分别称为常规结构、倒置结构和双异质结, 其结构示意图见图 1。

AlGaIn/GaN:Si	$5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	10nm
AlGaIn		5nm
-----		
GaN		$1.5 \mu\text{m}$
AlN		60nm
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	substrate	
(a)		
AlGaIn		4nm
GaN		6nm
-----		
AlGaIn		3nm
AlGaIn:Si	$5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	8nm
AlGaIn		50nm
GaN		$1.5 \mu\text{m}$
AlN		70nm
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	substrate	
(b)		
AlGaIn		3nm
AlGaIn	$8.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	2nm
AlGaIn		2nm
-----		
GaN		7nm
-----		
AlGaIn		2nm
AlGaIn	$1.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	2nm
GaN		$2.0 \mu\text{m}$
AlN		$0.14 \mu\text{m}$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	substrate	
(c)		

图 1 三种纵向结构的 AlGaIn/GaN HFET (a)常规结构;(b)倒置结构;(c)双异质结  
Fig. 1 Schematic of three AlGaIn/GaN HFET vertical structures (a) Normal;(b) Inverted;(c) Double hetero-structures

设计上述三种结构的出发点是:首先设计常规结构的 AlGaIn/GaN HFET,其优点是结构较简单,材料生长较容易,因此也可容易地获得良好的器件直流特性;设计倒置结构的目的是为了下一步设计双异质结构而作出的探索;最后根据这两种结构设计成功经验,设计出双异质结构,从而获得较为优秀的器件直流特性.

三种纵向结构的 AlGaIn/GaN HFET 均由反应分子束外延(RMBE)设备在蓝宝石(sapphire)衬底上外延生长.在全部的生长过程中,反应室的压力  $< 1.3 \times 10^7$  Pa.首先生长氮化铝(AlN)做缓冲层(buffer),衬底温度  $800^\circ\text{C}$ ,铝源温度  $1070^\circ\text{C}$ ,氮源氨气(ammonia)的流量为  $16\text{sccm/s}$ .

i-GaN 层的生长条件为:衬底温度  $700^\circ\text{C}$ ,镓源温度  $970^\circ\text{C}$ ,氨气流量  $35\text{sccm/s}$ ,使该层具有较高的电阻率和较低的本征掺杂浓度( $\sim 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ).作为隔离层的 AlGaIn,衬底温度  $800^\circ\text{C}$ ,Ga 源温度  $970^\circ\text{C}$ ,Al 源温度  $1070^\circ\text{C}$ ,氨气流量  $9\text{sccm/s}$ .它可以阻止施主层掺杂的硅原子扩散进入由 i-AlGaIn/i-GaN 构成的量子阱沟道界面.提供沟道电子施主层的 n-AlGaIn 的生长条件,除 Si 掺杂源温度为  $1230^\circ\text{C}$ (Al 的摩尔分数约为 0.3)外,其他条件与 i-AlGaIn 层的生长条件相同.制造肖特基势垒栅的顶层 AlGaIn 可以掺杂少量的 Si,也可以不做任何掺杂,其生长条件类似于施主层或隔离层.

对上述三种纵向结构的 AlGaIn/GaN HFET,采用相同的光刻版图和相似的工条件进行器件的制造,其光刻版图结构如图 2 所示.其中  $L_G = 2\mu\text{m}$ ,  $L_{DG} = 1\mu\text{m}$ ,  $L_{DS} = 4\mu\text{m}$ ,  $W_G = 40\mu\text{m}$ .

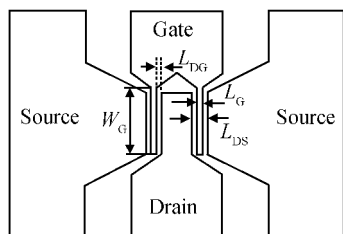


图 2 制造三种纵向结构的 AlGaIn/GaN HFET 的光刻版图

Fig. 2 Photolithography mask for three variant vertical structures

器件制造的工艺流程是:首先制造源、漏电极,利用电子束蒸发形成多层电极结构 Ti/Al/Ti/Au ( $20\text{nm}/120\text{nm}/40\text{nm}/20\text{nm}$ ).使用快速热退火(RTA)设备,在  $900^\circ\text{C}$ 、30s 氩气保护条件下形成良

好的源、漏欧姆接触.然后使用反应离子束刻蚀(RIE)设备,通入  $\text{BCl}_3$  刻蚀台阶,最后再次利用电子束蒸发形成 Pt/Au ( $30\text{nm}/70\text{nm}$ )肖特基势垒栅金属.

### 3 三种纵向结构器件的直流特性比较

对上述三种纵向结构制造完成的器件进行了直流特性测试,其结果如表 1 所示,其中双异质结器件的直流特性如图 3 所示.

表 1 三种纵向结构的 AlGaIn/GaN HFET 直流特性比较

Table 1 DC characteristic of three AlGaIn/GaN HFET variant structures

三种纵向结构	$G_M/(\text{mS} \cdot \text{mm}^{-1})$	$I_{DM}/(\text{mA} \cdot \text{mm}^{-1})$
常规结构	212	628
倒置结构	132	490
双异质结	275	1100

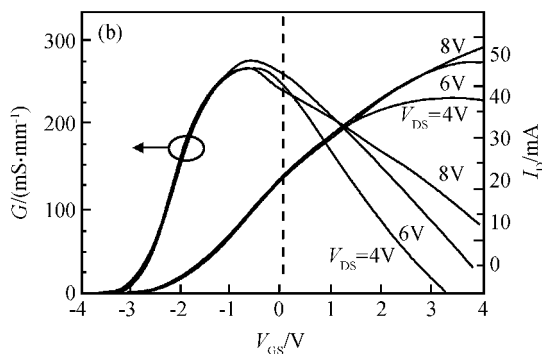
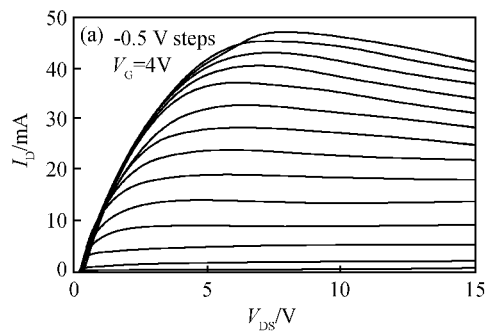


图 3 双异质结 AlGaIn/GaN HFET 的输出特性和转移特性曲线 (a)输出特性曲线;(b)转移特性曲线

Fig. 3 Double hetero-structures AlGaIn/GaN HFET's characteristic curves (a) Output characteristic;(b) Transfer characteristic

从器件直流特性可以看出:倒置结构器件的非本征跨导  $G_M$  和最大漏源电流  $I_{DM}$  均低于常规结构的数值.这表明此种结构可以获得器件的工作特性,

但要提高其性能指标具有一定的困难. 而采用双异质结构制造的器件可以获得比前两种结构更为优良的器件性能. 当然此种结构的材料生长要比前两种结构复杂, 在结构生长中膜厚的控制也要求更为精确.

以上的结果说明器件的纵向结构对器件的直流性能有着重要的影响: 常规结构的材料生长较为简单, 可以获得较好的直流特性. 倒置结构器件的直流特性低于常规结构的原因可能是因为顶部的肖特基势垒栅对倒置的异质结量子阱即二维电子气(2DEG)层的控制能力较弱所致. 而双异质结由于在沟道区存在两个 2DEG 层, 使得肖特基势垒栅对 2DEG 的控制能力较强, 所以它展现出比常规结构和倒置结构更为优越的器件直流特性  $G_M$  和  $I_{DM}$ .

## 4 结论

分别采用常规结构、倒置结构和双异质结设计 AlGaIn/GaN HFET, 用反应分子束外延完成器件结构的生长. 用相同的光刻版图和相似的工艺条件完成器件的制造. 对三种不同结构器件的直流性能的测试结果表明: 倒置结构器件的  $G_M$  和  $I_{DM}$  低于常规结构和双异质结器件的数值. 而双异质结器件的  $G_M$  和  $I_{DM}$  均高于其他两种结构器件的数值, 其原因是器件沟道中的两个二维电子气层可以提供更多的沟道载流子. 材料生长中要求常规结构、倒置结构均能在获得较好性能的基础上才能够生长出具有较好

性能结构的双异质结 AlGaIn/GaN HFET.

## 参考文献

- [1] Morkoc H, Strite S, Gao G, et al. Large band-gap SiC, III-V nitride and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies. *J Appl Phys*, 1994, 76:1363
- [2] Mohammad S N, Salvador A, Morkoc H. Emerging GaN based devices. *Proc IEEE*, 1995:1035
- [3] Yuan Mingwen, Pan Jing. Progress of microwave electronics on GaN. *Semiconductor Information*, 1999, 36(3): 1 (in Chinese) [袁明文, 潘静. 氮化镓微波电子学的进展. *半导体情报*, 1999, 36(3):1]
- [4] Khan M A, Bhatlara A, Kuznia J N, et al. High electron mobility transistor based on a GaN-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N heterojunction. *Appl Phys Lett*, 1993, 63(9):1214
- [5] Yu Huiqiang, Zhang Rong, Zhou Yugang, et al. The progress of GaN based HFETs. *Research & Progress of SSE*, 2001, 21(2):139 (in Chinese) [俞慧强, 张荣, 周玉刚, 等. GaN 基 HFET 的新进展. *固体电子学研究与进展*, 2001, 21(2):139]
- [6] Zeng Qingming, Lü Changzhi, Liu Weiji, et al. Study on AlGaIn/GaN HEMT devices. *Journal of Functional Materials and Devies*, 2000, 6(3):170 (in Chinese) [曾庆明, 吕长志, 刘伟吉, 等. AlGaIn/GaN HEMT 器件研究. *功能材料与器件学报*, 2000, 6(3):170]
- [7] Lü Changzhi, Feng Shiwei, et al. High temperature characteristics of AlGaIn/GaN double heterostructure HEMT. *Proc 10th Annual Symposium of the Chinese Institute of Electronics Reliability Society*, 2000:179 (in Chinese) [吕长志, 冯士维, 等. AlGaIn/GaN 双异质结 HEMT 的高温工作性能. *中国电子学会可靠性分会第十届学术年会论文集*, 2000:179]
- [8] Xiao Dongping, Liu Jian, Wei Ke, et al. High transconductance AlGaIn/GaN HEMT grown on sapphire substrates. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(9):907

## Characteristics Comparison of AlGaIn/GaN HFET for Three Variant Vertical Structure

Lü Changzhi<sup>1</sup>, Feng Shiwei<sup>1</sup>, Wang Dongfeng<sup>1</sup>, Zhang Xiaoling<sup>1</sup>, Xie Xuesong<sup>1</sup>, He Yan<sup>1</sup>, Zhang Hao<sup>1</sup>, Xu Liguó<sup>1</sup>, Yuan Mingwen<sup>2</sup>, Li Xiaobai<sup>2</sup>, and Zeng Qingming<sup>2</sup>

(1 School of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

(2 The 13th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** By the compared studies on the three AlGaIn/GaN HFET structures with normal, inverted, and double hetero-structures, it is found that the normal structure is the most simple one and is easily controllable for layer growth. The characteristics of inverted structure are poorer than one with normal structure, and those characteristics with double hetero-structure are better than the ones with normal and inverted structure, but its layer growth is much more complicated.

**Key words:** AlGaIn/GaN; HFET; inverted structure; double hetero-structure

**PACC:** 7340N

**Article ID:** 0253-4177(2005)S0-0155-03