

# SiC 衬底上高性能 AlGaIn/GaN HEMT 结构材料的研制\*

王晓亮<sup>†</sup> 王翠梅 胡国新 马志勇 肖红领 冉军学 罗卫军 唐 健 李建平 李晋闽 王占国

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 用金属有机物化学气相沉积技术(MOCVD)在半绝缘 4H-和 6H-SiC 衬底上研制出了高性能的具有国内领先和国际先进水平的 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT)材料, 室温二维电子气迁移率和浓度分别为  $2215\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  和  $1.044\times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ ; 50mm 外延片平均方块电阻不高于  $253.7\Omega/\square$ , 方块电阻不均匀性小于 2.02%; 三晶 X 射线衍射和原子力显微镜分析表明该材料具有较高的晶体质量和表面质量. 用以上材料研制出了 1mm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 功率器件, 8GHz 连续波输入下器件的输出功率密度为  $8.25\text{W}/\text{mm}$ , 功率附加效率为 39.4%; 对研制的器件进行了可靠性测试, 器件连续工作半小时后, 输出功率只下降了 0.1dBm, 表明所研制的器件具备了一定的可靠性.

**关键词:** AlGaIn/GaN; 高电子迁移率管; MOCVD; 功率器件; 碳化硅衬底

**EEACC:** 2560S; 0510; 2520D **PACC:** 6855; 7300; 8115

**中图分类号:** TN304.2<sup>3</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0402-05

## 1 引言

GaN 作为第三代宽禁带半导体的典型代表, 以其优异的性能而倍受人们关注. 与传统的 Si 和 GaAs 半导体材料相比, GaN 具有禁带宽度大、击穿电场高、电子饱和漂移速度高、抗辐射能力强、化学稳定性高等优异特性, 而且可以与 AlGaIn 和 In-GaN 合金材料构成异质结, 其异质界面上大的能带带阶及较强的极化效应可产生高浓度的二维电子气(2DEG), 电子气浓度比 GaAs 异质结提高了一个数量级. 因此, GaN 基材料是理想的高温、高频、大功率微波器件材料<sup>[1~5]</sup>, 有望在航天航空、高温辐射环境、石油勘探、自动化控制、雷达与通信、汽车电子等方面发挥重要的作用.

AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT)材料最常用的衬底为碳化硅(SiC)和蓝宝石. 与蓝宝石相比, SiC 同 GaN 的晶格常数更为接近, 而且热导率是蓝宝石的 10 倍, 因此 SiC 是制备 GaN 基高温、高频和大功率微波功率器件材料的理想衬底. 美国 APA 公司在 SiC 衬底上研制的 AlGaIn/GaN HEMT 材料的室温二维电子气迁移率为  $1800\sim 2300\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 二维电子气浓度在  $(1.0\sim 1.5)\times$

$10^{13}\text{cm}^{-2}$  之间<sup>[4]</sup>; 日本名古屋理工学院<sup>[5]</sup>和中国科学院半导体研究所<sup>[6]</sup>在蓝宝石衬底上研制的 Al-GaN/GaN HEMT 结构材料的室温二维电子气迁移率分别达到 2174 和  $2185\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 相应的二维电子气浓度分别为  $0.95\times 10^{13}$  和  $1.1\times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ . 以上材料指标代表着目前的最好水平. Cree 公司<sup>[1]</sup>在 SiC 衬底上研制的  $246\mu\text{m}$  栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 在 4GHz 时输出功率密度达到  $32.2\text{W}/\text{mm}$ , 8GHz 时输出功率密度达到  $30.6\text{W}/\text{mm}$ , 功率附加效率为 49.6%; NEC 公司<sup>[2]</sup>在 SiC 衬底上研制的 4mm 栅宽器件在 2GHz 时输出功率为 230W, 代表着目前 AlGaIn/GaN HEMT 的最高输出功率水平.

国内中国科学院半导体研究所在“九五”期间率先开展了 GaN 基 HEMT 结构材料和器件的研究工作. 2000 年 8 月, 中国电子集团第十三研究所与中国科学院半导体研究所合作, 用中国科学院半导体研究所生长的材料研制出了我国首支国产 GaN 基 HEMT, 2004 年 7 月研制出我国首支国产 X 波段 HEMT, 输出功率超过 1W. 近几年来, 我国 GaN 基 HEMT 结构材料和器件的研究取得了突破性进展, 中国科学院半导体研究所在蓝宝石衬底上研制的 GaN 基 HEMT 材料的性能为国内领先、国际先进水平<sup>[6~11]</sup>(见表 4 和表 5), 并实现了小批量供片. 研

\* 中国科学院知识创新工程(批准号: KGCX2-SW-107-1), 国家自然科学基金(批准号: 60606002), 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2002CB311903, 2006CB604905, 513270605)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: xlwang@red.semi.ac.cn

2007-01-04 收到

制的非有意掺杂高迁移率 GaN 材料室温电子迁移率达到  $740\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 非有意掺杂高阻 GaN 材料的室温电阻率大于  $1\times 10^9\Omega\cdot\text{cm}$ , AlGaIn/GaN HEMT 结构材料室温二维电子气迁移率达到  $2185\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 77K 时电子气迁移率超过  $15000\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ <sup>[6]</sup>; 室温二维电子气浓度最高为  $1.78\times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ , 室温二维电子气浓度与迁移率乘积的最大值为  $2.68\times 10^{16}/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 典型值为  $2.38\times 10^{16}/(\text{V}\cdot\text{s})$ ; 50mm HEMT 外延片方块电阻最小值为  $194.9\Omega/\square$ , 典型值为  $270\Omega/\square$ , 方块电阻均匀性优于 98%. 中国科学院微电子所、中电集团五十五所和十三所用中国科学院半导体所研制的材料, 研制出了高性能的 C 波段和 X 波段 HEMT 功率器件. 其中, 中国科学院微电子所用中国科学院半导体所在蓝宝石衬底上研制的 AlGaIn/GaN HEMT 结构材料, 与中国科学院半导体所合作, 研制出了高性能的 C 波段和 X 波段高温、高频、大功率 GaN 基功率器件, C 波段栅长  $0.8\mu\text{m}$  器件的指标如下:  $W_g = 1.2\text{mm}$ ,  $I_{\text{max}} = 0.968\text{A}/\text{mm}$ ,  $g_m = 231\text{mS}/\text{mm}$ ,  $f_T = 20\text{GHz}$ ,  $f_{\text{max}} > 30\text{GHz}$ ; 栅宽  $60\mu\text{m}$  器件在  $5.4\text{GHz}$  连续波时输出功率为  $10.47\text{W}$ , 功率密度达到  $8.72\text{W}/\text{mm}$ , 线性功率增益为  $14.5\text{dB}$ . X 波段器件,  $L_g = 0.25\mu\text{m}$ ,  $g_m = 250\text{mS}/\text{mm}$ ,  $f_T = 77\text{GHz}$ ,  $f_{\text{max}} > 60\text{GHz}$ ;  $1\text{mm}$  X 波段 GaN 器件在  $8\text{GHz}$  连续波时, 器件的输出功率为  $4\text{W}$ , 输出功率密度达到  $4\text{W}/\text{mm}$ .

最近, 中国科学院半导体研究所 SiC 衬底 AlGaIn/GaN HEMT 材料研制工作取得突破性进展<sup>[12,13]</sup>, 研制出了室温二维电子气迁移率和浓度分别为  $2215\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  和  $1.044\times 10^{13}\text{cm}^{-2}$  的 HEMT 材料, 中电集团 55 所用中国科学院半导体所的材料, 与中国科学院半导体所合作研制出了  $8\text{GHz}$  时连续波输出功率为  $8.25\text{W}$  的 X 波段 HEMT 功率器件. 本文对中国科学院半导体所在 SiC 衬底 GaN 基 HEMT 材料研究方面所取得的进展进行了简要介绍.

## 2 材料生长与器件研制

用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 设备在半绝缘 4H-和 6H-SiC 衬底上研制了 AlGaIn/GaN HEMT 结构材料. 三甲基镓 (TMG), 三甲基铝 (TMA) 和氨气 ( $\text{NH}_3$ ) 分别作为镓源、铝源和氮源. 生长过程包括衬底高温除气处理、成核层、高阻 GaN 缓冲层、AlGaIn 势垒层生长等. 选用优化的生长工艺条件, 分别在三个 50mm 半绝缘 4H-SiC 衬底和一个 50mm 半绝缘 6H-SiC 衬底上, 生长了 AlGaIn/GaN HEMT 结构材料.

对研制的 SiC 衬底 AlGaIn/GaN HEMT 结构

材料进行了三轴晶 (TAXRD) X 衍射 (Rigaku SLX-1AL)、原子力显微镜 (AFM) (Digital Instrument Nanoscope IV)、Hall 和 Lehighton 方块电阻测试, 中国电子集团公司第五十五研究所陈堂胜研究员等人用所提供样品进行了器件研制和器件性能测试.

## 3 结果与讨论

图 1 为 SiC 衬底 AlGaIn/GaN HEMT 结构材料 TAXRD  $\omega/2\theta$  扫描曲线 (样品 G054)<sup>[12]</sup>, 图中 4 个清晰的衍射峰从左向右依次对应为 GaN(0002), AlGaIn(0002), SiC(0006) 和 AlN(0002) 衍射峰, 材料结晶完整, 无杂相产生. X 射线摇摆曲线半高宽是表征材料结晶质量的重要参数, 表 1 给出了样品的 GaN(0002) 和 GaN(10 $\bar{1}2$ ) 衍射峰 TAXRD  $\omega$  扫描摇摆曲线半高宽测试结果. 从表 1 和图 1 插图可以看出, 采用晶格更加匹配的 SiC 衬底, GaN 晶体质量显著提高, GaN(0002) 衍射峰的半高宽约为  $3.24^\circ$ , GaN(10 $\bar{1}2$ ) 衍射峰的半高宽约为  $4.50^\circ$ .

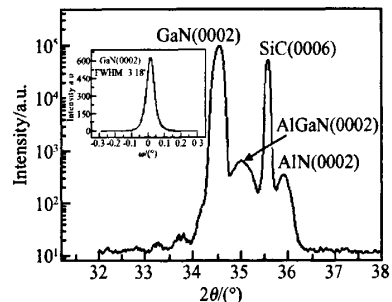


图 1 SiC 衬底 AlGaIn/GaN HEMT 结构材料 TAXRD 扫描曲线 插图为 GaN(0002) 衍射峰的摇摆曲线测试结果<sup>[12]</sup>.

Fig.1 TAXRD measurement for AlGaIn/GaN HEMT materials on SiC substrate The inset shows the XRD rocking curve of GaN(0002) peak<sup>[12]</sup>.

表 1 SiC 衬底 AlGaIn/GaN HEMT 结构材料 TAXRD  $\omega$  扫描摇摆曲线半高宽测试结果

Table 1 XRD rocking curve results of AlGaIn/GaN HEMT materials on SiC substrate

样品编号	半高宽/ $^\circ$		备注
	GaN(0002)	GaN(10 $\bar{1}2$ )	
G075(AS1232-05)	3.12	4.50	测试单位: 中国科学院 半导体所 测试时间: 2006 年 5 月 11 日
G085(AS1232-08)	3.18	4.50	
G088(AS1237-11)	3.24	4.38	

采用 AFM 技术对 SiC 衬底 AlGaIn/GaN HEMT 结构材料的表面形貌进行了测试, 扫描面积分别为  $2\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$  和  $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ . 测

试结果显示样品的表面平整光滑,原子生长台阶清晰,样品的表面均方根粗糙度(RMS)测试结果列于表2.从表2可以看出,测试的三个样品均具有非常低的均方根粗糙度值.

表2 SiC衬底 AlGaIn/GaN HEMT结构材料表面均方根粗糙度(RMS)测试结果

Table 2 RMS results of AlGaIn/GaN HEMT materials on SiC substrates

样品编号	表面粗糙度/nm			备注
	2 $\mu\text{m}$ × 2 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$ × 5 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$ × 10 $\mu\text{m}$	
G075(AS1232-05)	0.133	0.193	0.277	测试单位:清华大学 强度与振动中心 测试时间:2006年 04月28日
G085(AS1232-08)	0.164	0.235	0.330	
G088(AS1237-11)	0.181	0.218	0.239	

表3给出了50mm SiC衬底 AlGaIn/GaN HEMT结构材料外延片方块电阻和方块电阻均匀性的测试结果.样品具有非常低的平均方块电阻和非常好的方块电阻均匀性,4个样品的平均方块电阻不高于253.7 $\Omega/\square$ ,方块电阻不均匀性不高于2.02%.测试结果表明,中国科学院半导体研究所研制的SiC衬底 AlGaIn/GaN HEMT结构材料非常适合大尺寸 AlGaIn/GaN HEMT的研制.表4给出了 AlGaIn/GaN HEMT结构材料外延片方块电阻国际研究水平对比,从表中可以看出,中国科学院半导体研究所研制的 AlGaIn/GaN HEMT结构材料性能已达到国际先进水平.

表3 50mm SiC衬底 AlGaIn/GaN HEMT外延片方块电阻和方块电阻均匀性的测试结果

Table 3 Sheet resistance and resistance uniformity of 50mm AlGaIn/GaN HEMT materials on SiC substrates

样品编号	方块电阻/( $\Omega/\square$ )			不均匀性/%	备注
	平均值	最大值	最小值		
G075(AS1232-05)	253.7	264.4	246.0	1.95	测试单位:北京 圣科佳电 子有限责 任公司
G085(AS1232-08)	248.5	253.9	244.6	0.97	
G088(AS1237-11)	245.4	250.4	241.2	1.14	
G054(A11-029-08)	251.0	260.2	241.2	2.02	测试单位:中 电集团第 十五研究 所

图2给出了SiC衬底 AlGaIn/GaN HEMT结构材料变温霍尔(Hall)测量的典型结果(G054样品)<sup>[12]</sup>,测量温度范围为293~650K.从图2可以看出,样品的室温二维电子气迁移率和浓度分别为2215 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 和 $1.044 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ .当温度升高为400K和500K,样品的电子迁移率仍保持在较高的迁移率1159和750 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ,表明所研制的 AlGaIn/GaN HEMT结构材料非常适合在中高温

工作.表5给出了 AlGaIn/GaN HEMT结构材料二维电子气性能与国际研究水平的对比,从表中可以看出,室温二维电子气迁移率2215 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 为已报道的SiC衬底 AlGaIn/GaN HEMT结构材料电子迁移率最高结果之一.

表4 AlGaIn/GaN HEMT结构材料外延片方块电阻与国际研究水平对比

Table 4 Sheet resistance of HEMT structures obtained from different research groups

衬底	研究机构	方块电阻	出处
SiC	APA	260~ 320 $\Omega/\square$	<a href="http://www.apaenterprises.com/AlGaNHEFTs.htm">http://www.apaenterprises.com/AlGaNHEFTs.htm</a>
	Cree	265 $\Omega/\square$	IEEE EDL,2004,25(5):117
	Cornell	280 $\Omega/\square$	IEEE TED,2004,51(2):117
	中科院 半导体所	253.7 $\Omega/\square$	06年4月北京圣科电子有 限责任公司测试结果
		248.5 $\Omega/\square$	
245.4 $\Omega/\square$			
		251.0 $\Omega/\square$	06年3月中电集团55所测试 结果
Sapphire	中科院 半导体所	194.9 $\Omega/\square$ (1.86%)	05年4月底测评结果
		256.2 $\Omega/\square$ (1.14%)	06年3月中电集团55所测试 结果
		248.7 $\Omega/\square$ (1.01%)	06年4月北京圣科电子有 限责任公司测试结果
		249.8 $\Omega/\square$ (0.63%)	
	国外	380 $\Omega/\square$	2004 JJAP,43(12):7939
		340 $\Omega/\square$	2004 MRS. Symp. PROC. 798. Y10. 22.1
		一般300~ 700 $\Omega/\square$	—
Si	Nitronex	300 $\Omega/\square$	IEEE EDL,2004,25(7):292

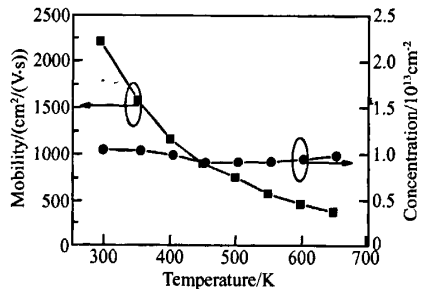


图2 SiC衬底 AlGaIn/GaN HEMT结构材料变温霍尔测试结果<sup>[12]</sup>

Fig.2 Hall results of AlGaIn/GaN HEMT on SiC substrates

中国电子集团公司第55研究所用中国科学院半导体研究所研制的样品号为G054的材料,与中国科学院半导体所合作进行了X波段1mm栅宽Al-

GaN/GaN HEMT 研制,器件性能的测试结果如表 6 所示.在半绝缘 6H-SiC 衬底上研制的 1mm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT,在 8GHz 连续波、工作电压为 34.3V 和输入功率为 32.46dBm 时,输出功率为 39.16dBm(8.25W),输出功率密度为 8.25W/mm,功率增益为 6.7dB,功率附加效率为 39.4%.

对 6H-SiC 衬底上研制的 AlGaIn/GaN HEMT 的可靠性进行了测试,测试时器件工作在饱和输出状态,工作电压约为 34V,输入功率固定为 32dBm,器件的输出功率随时间变化如表 7 所示.结果显示,半小时后器件的输出功率仅降低了 0.1dBm,表明所研制的器件具备了一定的可靠性.

表 5 AlGaIn/GaN HEMT 结构材料二维电子气与国际研究水平对比

Table 5 Room temperature Hall results of HEMT structures obtained from different research groups

衬底	室温电子迁移率 $\mu/(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$	室温电子浓度 $n/\text{cm}^{-2}$	RT $\mu \times n$ $/(10^{18}\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	研究机构	出处
SiC	1800~2300 <sup>①</sup> 2019 <sup>②</sup>	(1.0~1.5) $\times 10^{13}$ <sup>①</sup> $1.3 \times 10^{13}$ <sup>②</sup>	2.62 <sup>②</sup>	APA Optics	①[4] <a href="http://www.apaenterprises.com/AlGaNHFETs.htm">http://www.apaenterprises.com/AlGaNHFETs.htm</a> ②APL,1998,72:707
	2215	1.044	2.31	中国科学院 半导体所	[12] J Cryst Growth,2007,298:835
	1944	1.03	2.00		Chinese Journal of Semiconductors, 2006,27(9):1521
Sapphire/AlN 模板	2174	$0.95 \times 10^{13}$	2.065	名古屋理工学院	①[5] APL,2004,85:1770 ②JAP.2005 98:063713
Sapphire	2185	$1.1 \times 10^{13}$	2.404	中国科学院 半导体所	[6] J Cryst Growth,2007,298:791
	2100	$1.1 \times 10^{13}$	2.31		[7] Phys Status Solidi C,2006,3(3): 607
	1680	$0.8 \times 10^{13}$	1.34	Center for Nano Materials and Technology,JAIST	Solid State Communications, 2005, 133:647
	1550	$0.9 \times 10^{13}$	1.395	IMEC-MCP, Belgium	JAP,2005,98,054501
HR-Si	1850	$\sim 0.5 \times 10^{13}$	-	CRHEA-CNRS	JCG,2005,278:383
	-	-	2.1	Nitronex	IEEE EDL,2004,25(7):459
HVPE-GaN	1920	$0.91 \times 10^{13}$	1.747	Cree	IEEE EL,2004,40(19):1026 JCG,2005,281(1):32
GaN	2600	$2.9 \times 10^{13}$	7.54	HPRC,PAS	Phys Status Solidi A,2004,201:320

表 6 6H-SiC 衬底 1mm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 性能测试结果

Table 6 Performance of 1mm-gate-width AlGaIn/GaN HEMT on 6H-SiC substrate

样品衬底	工作电压 $V_{DS}$	输入功率 $P_{in}$	输出功率 $P_{out}$	功率增益 $G_p$	工作电流 $I_{DS}$	PAE	输出功率 $P_{out}$	备注
6H-SiC	34.3 V	32.46dBm	39.16dBm	6.7dB	0.48A	39.4%	8.25W	973 项目办第 二次测评结果

表 7 SiC 衬底 1mm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 稳定性测试结果 测试频率:8GHz

Table 7 Measured stability results of 1mm-gate-width AlGaIn/GaN HEMT on SiC substrate at 8GHz

工作电压 $V_{ds}/\text{V}$	输入		输出							
	项目	数值	项目	起始	5min	10min	15min	20min	25min	30min
34.3	$P_{in}/\text{dBm}$	32.46	$P_{out}/\text{dBm}$	39.13	39.09	39.05	39.05	39.04	39.03	39.03
	$P_{in}/\text{W}$	1.76	$P_{out}/\text{W}$	8.18	8.11	8.04	8.04	8.02	8.00	8.00
	$I_{ds}/\text{A}$	0.48	$I_{ds}/\text{A}$	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48

## 4 结论

用 MOCVD 技术在半绝缘 4H-和 6H-SiC 衬底上研制出了具有国内领先和国际先进水平的高性能 AlGaIn/GaN HEMT 材料,室温二维电子气迁移率

和浓度分别为  $2215\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  和  $1.044 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ ;TAXRD 分析表明材料具有较高的晶体质量,GaN(0002)和(10 $\bar{1}2$ )衍射峰的半高宽分别为  $3.24^\circ$  和  $4.50^\circ$ ,原子力测试表明样品的表面形貌较好.所研制的样品具有非常低的平均方块电阻和非常好的方块电阻均匀性,平均方块电阻小于

253.7 $\Omega/\square$ , 方块电阻不均匀性小于 2.02%。中电集团五十五所研制的材料与我们合作研制出了 1mm 栅宽 AlGaIn GaN HEMT, 在半绝缘 6H-SiC 衬底上研制器件, 8GHz 连续波、工作电压 34.3V 和输入功率 32.46dBm 时, 输出功率为 39.16dBm (8.25W), 输出功率密度为 8.25W/mm, 功率增益为 6.7dB, 功率附加效率为 39.4%。可靠性测试, 连续工作半小时后器件的输出功率仅降低了 0.1dBm, 表明器件具备了一定的可靠性。

**致谢** 中国电子科技集团公司第五十五研究所陈堂胜研究员等对中国科学院半导体所提供的 SiC 衬底 AlGaIn/GaN HEMT 材料进行了器件研制, 在此表示衷心感谢。北京圣科佳电子有限公司周钧铭研究员、清华大学华心教授、中国科学院半导体所王玉田研究员等对 AlGaIn/GaN HEMT 结构材料进行了测试, 在此一并表示感谢!

#### 参考文献

- [1] Wu Y F, Saxler A, Moore M, et al. 30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, 25(3): 117
- [2] Okamoto Y, Ando Y, Hataya K, et al. Improved power performance for a recessed-gate AlGaIn-GaN heterojunction FET with a field-modulating plate. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2004, 52(11): 2536
- [3] Kumar V, Lu W, Schwindt R, et al. AlGaIn/GaN HEMTs on SiC with  $f_T$  of over 120GHz. *IEEE Electron Device Lett*, 2002, 23(8): 455
- [4] <http://www.apaenterprises.com/AlGaNHFETs.htm>
- [5] Miyoshi M, Ishikawa H, Egawa T, et al. High-electron-mobility AlGaIn/AlN/GaN heterostructures grown on 100-mm-diam epitaxial AlN/sapphire templates by metalorganic vapor phase epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(10): 1710
- [6] Wang Xiaoliang, Wang Cuimei, Hu Guoxin, et al. MOCVD-grown high mobility Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N/AlN/GaN HEMT structure on sapphire substrate. *J Cryst Growth*, 2007, 298: 791
- [7] Wang Xiaoliang, Wang Cuimei, Hu Guoxin, et al. Room temperature mobility above 2100cm<sup>2</sup>/(V·s) in Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N/AlN/GaN heterostructures grown on sapphire substrates by MOCVD. *Phys Status Solidi C*, 2006, 3(3): 607
- [8] Wang Cuimei, Wang Xiaoliang, Hu Guoxin, et al. The effect of AlN growth time on the electrical properties of Al<sub>0.38</sub>Ga<sub>0.62</sub>N/AlN/GaN HEMT structures. *J Cryst Growth*, 2006, 289(2): 415
- [9] Wang Cuimei, Wang Xiaoliang, Hu Guoxin, et al. Influence of AlN interfacial layer on electrical properties of high-Al-content Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>N/GaN HEMT structure. *Appl Surf Sci*, 2006, 253(2): 762
- [10] Wang Xiaoliang, Liu Xinyu, Hu Guoxin, et al. X-band GaN power HEMTs with power density of 2.23W/mm grown on sapphire by MOCVD. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(10): 1865
- [11] Wang X L, Wang C M, Hu G X, et al. Improved DC and RF performance of AlGaIn/GaN HEMTs grown by MOCVD on sapphire substrates. *Solid-State Electron*, 2005, 49(8): 1387
- [12] Wang Xiaoliang, Hu Guoxin, Ma Zhiyong, et al. AlGaIn/AlN/GaN/SiC HEMT structure with high mobility GaN thin layer as channel grown by MOCVD. *J Cryst Growth*, 2007, 298: 835
- [13] Wang Xiaoliang, Hu Guoxin, Ma Zhiyong, et al. MOCVD-grown AlGaIn/AlN/GaN HEMT structure with high mobility GaN thin layer as channel on SiC. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(9): 1521

## High Quality AlGaIn/GaN HEMT Materials Grown on SiC Substrates\*

Wang Xiaoliang<sup>†</sup>, Wang Cuimei, Hu Guoxin, Ma Zhiyong, Xiao Hongling, Ran Junxue, Luo Weijun, Tang Jian, Li Jianping, Li Jinmin, and Wang Zhanguo

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** High quality AlGaIn/GaN HEMT materials were successfully fabricated on 4H- and 6H-SiC substrates by MOCVD method. High electron mobility and density of 2215cm<sup>2</sup>/(V·s) and 1.044 × 10<sup>19</sup>cm<sup>-2</sup> were obtained at room temperature. Average sheet resistance lower than 253.7 $\Omega/\square$  and resistance uniformity better than 2.02% were also realized on the 2-inch HEMT wafers. TCXRD and AFM measurements showed that the HEMT material has a high crystal quality and smooth surface morphology. Power devices with gate width of 1mm were fabricated using the HEMT wafers. At 8GHz, the output power density is 8.25W/mm and the associated PAE is 39.4%. The output power was reduced only 0.1dBm after half an hour, suggesting the device has a comparatively high reliability.

**Key words:** AlGaIn/GaN; HEMT; MOCVD; power device; SiC substrate

**EEACC:** 2560S; 0510; 2520D **PACC:** 6855; 7300; 8115

**Article ID:** 0253-4177(2007)S0-0402-05

\* Project supported by the Key Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KGCX2-SW-107-1), the National Natural Science Foundation of China (No. 60606002), and the Special Funds for Major State Basic Research Project (Nos. 2002CB311903, 2006CB604905, 513270605)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: xlwang@red.semi.ac.cn

Received 4 January 2007