

# AlN 隔离层对 MOCVD 制备的 AlGaIn/AlN/GaN HEMT 材料电学性质的影响

陈翔<sup>1</sup> 邢艳辉<sup>1</sup> 韩军<sup>1</sup> 李影智<sup>1</sup> 邓旭光<sup>1</sup> 范亚明<sup>2</sup> 张晓东<sup>2</sup> 张宝顺<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>北京工业大学电子信息与控制工程学院 光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

<sup>2</sup>中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123

**摘要** 采用金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)方法制备了不同 AlN 隔离层厚度的 AlGaIn/AlN/GaN 结构的高电子迁移率晶体管(HEMT)材料。研究了 AlN 隔离层对 HEMT 材料电学特性的影响。AlN 隔离层厚度约为 1.5 nm 的 HEMT 材料,二维电子气浓度和迁移率分别达到  $1.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  和  $1680 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、方块电阻低至  $310 \Omega$ ,体现了 HEMT 材料良好的电学性能。原子力显微镜和高分辨 X 射线衍射测试结果显示 HEMT 材料具有较好的表面形貌和异质结界面,较好的异质结界面也有利于增强 HEMT 材料的二维电子气浓度和迁移率。

**关键词** 材料; AlN; 高电子迁移率晶体管; 电学性质; 二维电子气; 迁移率

中图分类号 TN386; O782+.9 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0606005

## Influence of AlN Interfacial Layer on Electrical Properties of AlGaIn/AlN/GaN HEMT Materials Grown by MOCVD

Chen Xiang<sup>1</sup> Xing Yanhui<sup>1</sup> Han Jun<sup>1</sup> Li Yingzhi<sup>1</sup> Deng Xuguang<sup>1</sup>

Fan Yaming<sup>2</sup> Zhang Xiaodong<sup>2</sup> Zhang Baoshun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Opto-Electronics Technology, College of Electronic Information and Control Engineer, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

<sup>2</sup>Suzhou Institute of Nano-Technology and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China

**Abstract** AlGaIn/AlN/GaN high electron mobility transistors (HEMT) structures with AlN interfacial layer of various thicknesses are grown by metalorganic chemical vapor deposition, and their electrical properties are investigated. The HEMT sample with an AlN layer thickness of about 1.5 nm shows a highly Hall mobility of  $1680 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  with a low sheet resistance of  $310 \Omega$ , and high two-dimensional electron gas (2DEG) density of  $1.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  are obtained at room temperature, indicating good electrical properties of the HEMT material. Furthermore, the results from atomic force microscopy and high resolution X-ray diffraction measurements confirm that the samples possess well surface morphology and heterostructure interface. Thence, the well heterostructure interface enhances the 2DEG density and mobility of the HEMT materials.

**Key words** materials; AlN; high electron mobility transistor; electrical properties; two-dimensional electron gas; mobility

**OCIS codes** 160.6000; 310.1860; 310.3840; 310.6870

收稿日期: 2013-01-16; 收到修改稿日期: 2013-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(61176126, 61006084, 61204011)、国家杰出青年科学基金(60925017)和北京市自然科学基金(4102003, 4112006)资助课题。

作者简介: 陈翔(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事氮化镓基半导体材料生长方面的研究。

E-mail: xchen2012@sinano.ac.cn

导师简介: 邢艳辉(1974-), 女, 博士, 副教授, 主要从事氮化镓半导体材料的生长、测试分析及器件等方面的研究。

E-mail: xingyanhui@bjut.edu.cn (通信联系人)

## 1 引言

GaN 基半导体材料是继 Si 和 GaAs 之后的第三代半导体材料, AlGaIn/GaN 异质结半导体材料具有禁带宽度大、击穿电场强度大、载流子饱和迁移率高等优点<sup>[1,2]</sup>。此外,与 AlGaAs/GaAs 异质结材料相比, AlGaIn/GaN 异质结具有很强的自发极化和压电极化效应,以及更大的导带不连续性,从而在 AlGaIn/GaN 界面处产生更高的二维电子气(2DEG)浓度<sup>[3,4]</sup>。因此,基于 AlGaIn/GaN 异质结材料制作的高电子迁移率晶体管(HEMT)在高温、高频、高压、大功率等领域具有广阔的发展前景,现已被广泛应用于微波射频器件和电力电子器件领域<sup>[5~7]</sup>。

GaN HEMT 器件的性能很大程度上取决于制作器件的 AlGaIn/GaN 异质结材料的结构和质量,为了制备高性能的 AlGaIn/GaN HEMT 器件,应尽可能增加 AlGaIn/GaN 异质结材料的质量并且减小方块电阻。HEMT 材料的方块电阻由二维电子气浓度和迁移率共同决定。因此,需要提高 AlGaIn/GaN 异质结中的二维电子气浓度和迁移率<sup>[1,4]</sup>。近年来 Kawakami 等<sup>[8,9]</sup>使用了 AlN/GaN 超晶格替代 AlGaIn 势垒层来提高二维电子气浓度和迁移率。但是,由于外延周期较多的超晶格在技术上难度较大,对每一层厚度的控制要求严格,同时要求界面陡峭,对金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)设备的源供应系统的性能要求也较高,这在很大程度上限制了人们对超晶格的使用<sup>[10]</sup>。因此,单一 AlN 隔离层技术是目前相对简单而有效的提高二维电子气浓度和迁移率的方法之一。

本文采取在 HEMT 结构中的 AlGaIn 势垒层和 GaN 沟道层之间插入 AlN 隔离层的方法来提高二维电子气浓度和迁移率。通过改变 AlN 隔离层生长时间,研究了 AlN 隔离层厚度对 HEMT 材料电学性质的影响。研究发现,在 AlGaIn/GaN HEMT 结构中的 AlGaIn 势垒层和 GaN 沟道层之间插入约 1.5nm 的 AlN 隔离层能显著增加二维电子气浓度和迁移率。此外还讨论了 AlN 隔离层厚度对 HEMT 样品表面形貌的影响。

## 2 实验

实验所有样品均在美国 Veeco D180 型 MOCVD 系统上生长的。外延采用直径为两英寸的(0001)面蓝宝石为衬底。分别采用三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAI)、二茂铁( $Cp_2Fe$ )、高纯

氨气( $NH_3$ )为 Ga 源、Al 源、Fe 源和 N 源,高纯氢气( $H_2$ )作为载气。外延 HEMT 材料过程如下:首先,蓝宝石衬底在 1050 °C、 $H_2$  气氛下保持 3 min,进行表面预处理。之后,降低温度至 500 °C,生长厚为 25 nm 的低温 GaN(LT-GaN)成核层。然后,升高温度至 1000 °C,通入  $Cp_2Fe$  淀积一层 Fe 掺杂高阻 GaN 缓冲层。之后,保持相同的条件,外延非故意掺杂 GaN(U-GaN)沟道层, GaN 总厚度约为 4  $\mu m$ 。随后温度升高至 1050 °C,在反应室压力、TMAI 流量等生长参数已优化的前提下,通过改变 AlN 隔离层生长时间,生长了 4 个不同 AlN 隔离层厚度的样品分别编号为 A、B、C、D,生长时间分别为 0、60、90、120 s(生长速率为 1 nm/min)。最后,保持温度为 1050 °C,生长厚度为 25nm 的  $Al_xGa_{1-x}N$  势垒层(实验设计 Al 的摩尔分数为 25%)。图 1 为没有和有 AlN 隔离层的 HEMT 样品结构示意图。

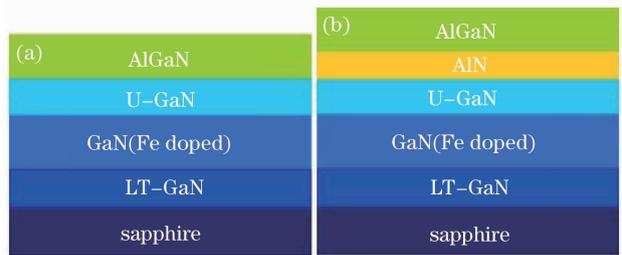


图 1 HEMT 材料结构示意图。(a)没有 AlN 隔离层;  
(b)有 AlN 隔离层

Fig. 1 Schematic diagram of HEMT materials (a) without and (b) with AlN interfacial layer

HEMT 样品的电学性能通过范德堡法进行室温(300 K)霍尔测试。样品的表面形貌通过 Veeco Dimension 3100 原子力显微镜(AFM)测试获得。HEMT 材料  $Al_xGa_{1-x}N$  势垒层的固相 Al 组分通过 Bruker D8 Discover 高分辨 X 射线衍射仪(HR-XRD)三轴晶联动扫描模式测试。

## 3 实验结果与讨论

在室温条件下分别对有和没有 AlN 隔离层的 4 个 HEMT 结构样品进行霍尔测试,测试结果如表 1 所示。二维电子气浓度和迁移率随 AlN 隔离层生长时间的关系如图 2 所示。从图 2 可以看出,二维电子气浓度和迁移率随 AlN 隔离层生长时间(即 AlN 隔离层厚度)的变化而变化。无 AlN 隔离层的样品 A,二维电子气迁移率较小为 1090  $cm^2/Vs$ 。随着 AlN 隔离层厚度的增加,样品 C 的迁移率最大,为 1680  $cm^2/Vs$ 。随着 AlN 厚度的进一步增

加,样品 D 的迁移率反而减小。AlN 隔离层的引入,一定程度上减小了 AlGaIn 势垒层对二维电子气的合金无序散射作用,提高了二维电子气的迁移率<sup>[11]</sup>。然而,由于 AlN 与 GaN 之间存在晶格失配,随着 AlN 隔离层厚度的进一步增加,过厚的 AlN

层可能会增加异质结界面粗糙度[均方根(RMS)],产生更多的失配位错,从而增加对二维电子气的界面粗糙度散射和位错散射,导致二维电子气迁移率下降。

表 1 不同 AlN 生长时间的 HEMT 材料的测试结果

Table 1 Test results of HEMT materials with different AlN growing times

Sample	AlN grown time /s	Mobility /( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	2DEG density /( $10^{13} \text{cm}^{-2}$ )	$R_s/\Omega$	RMS /nm
A	0	1090	0.974	588	0.24
B	60	1310	1.17	369	0.91
C	90	1680	1.2	310	1.22
D	120	1290	1.31	407	1.31

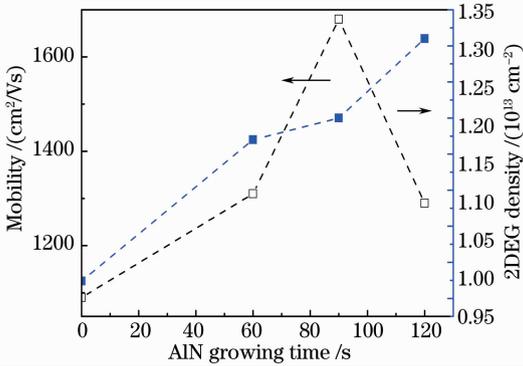


图 2 二维电子气迁移率和浓度与 AlN 生长时间的关系

Fig. 2 2DEG mobility and density as a function of AlN growing time

从图 2 还可发现二维电子气浓度随 AlN 厚度的变化趋势与迁移率随 AlN 厚度的变化趋势不尽相同。无 AlN 隔离层的 HEMT 样品 A 的二维电子气浓度仅为  $9.74 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ , 加入 AlN 隔离层的样品二维电子气浓度得到显著增加, 达到  $10^{13}$  量级, 且样品 B、C、D 的二维电子气浓度随 AlN 厚度的增加而增加。当 AlN 生长时间为 90 s 时 (AlN 厚度约为 1.5 nm), 样品 C 的二维电子气浓度较样品 A 增加了 23%, 达到  $1.2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 。与 AlGaIn 相比, AlN 具有更大的禁带宽度, 即 AlN 和 GaN 间的导带不连续性比 AlGaIn 和 GaN 间的导带不连续性大, 从而在 AlN/GaN 界面处形成更深的势阱, 将电子限制在 GaN 沟道中, 抑制了电子从 GaN 沟道穿透到 AlGaIn 势垒层, 进而显著增加了二维电子气浓度。根据 Hsu 等<sup>[12]</sup> 的研究发现, 当电子向 AlN 隔离层渗透时, 电子波函数随渗透深度呈指数衰减。因此, 随着 AlN 隔离层厚度的增加, 更少的电子穿透 AlN 隔离层进入到 AlGaIn 势垒层中, 从而增强了对二维电子气的限制作用, 提高了 GaN 沟道中的二维电子气浓度。

HEMT 材料的方块电阻  $R_s$  由二维电子气浓度和迁移率共同决定, 可以根据以下公式计算出 4 个样品的方块电阻<sup>[4]</sup>

$$R_s = \frac{1}{\mu n_s e}, \quad (1)$$

式中  $\mu$  为二维电子气迁移率;  $n_s$  为二维电子气浓度;  $e$  为电子的电荷量。方块电阻  $R_s$  计算结果如表 1 所示。图 3 为 4 个样品的方块电阻随 AlN 隔离层厚度的变化关系。无 AlN 隔离层的样品 A 方块电阻较大, 为 588  $\Omega$ 。随着 AlN 隔离层厚度的增加, 方块电阻显著减小。当 AlN 厚度约为 1.5 nm 时, 样品 C 的方块电阻最小, 为 310  $\Omega$ 。进一步增加 AlN 厚度, 样品 D 的方块电阻反而增加。从图 3 方块电阻的变化趋势可推断, 存在较理想的 AlN 生长窗口 (AlN 厚度为 1.5 nm 左右), 制备的样品 C 具有较低的方块电阻, 仅为 310  $\Omega$ 。同时, 材料又具有较高的二维电子气浓度 ( $1.2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ ) 和迁移率 ( $1680 \text{cm}^2/\text{Vs}$ )。

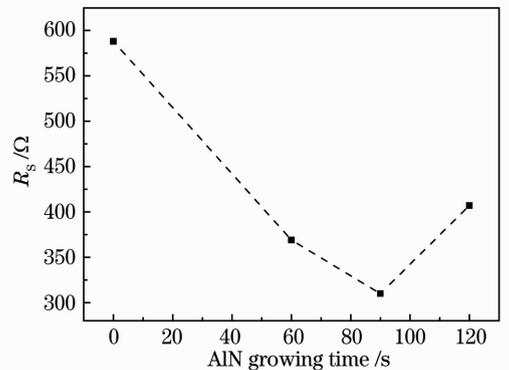


图 3 HEMT 样品的方块电阻与 AlN 生长时间的关系

Fig. 3  $R_s$  of HEMT samples as a function of AlN growing time

图 4 显示了 4 个样品的 AFM 表面形貌, 扫描区域为  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ , 表面粗糙度列于表 1。图 4(a)

可看到明显的原子台阶,样品表面平整,表面粗糙度仅为 0.24 nm。随着 AlN 隔离层厚度的增加,样品表面变得不平整,粗糙度逐渐增大。这可能是由于 GaN 与 AlN 之间存在晶格失配,且 Al-N 键能高(2.88 eV)Al 原子在表面迁移所需的激活能高,导致 Al 原子在生长表面的迁移能力较差,这些因素综合导致了界面粗糙度增大和位错的增多<sup>[13]</sup>,从而增加了对二维电子气的界面粗糙度散射和位错散

射,导致二维电子气迁移率下降。这从另一方面解释了二维电子气迁移率随 AlN 厚度增加反而下降的实验结果。界面粗糙度的增大和位错的增多进而对后续的  $Al_xGa_{1-x}N$  势垒层的外延造成不利影响,增大了其表面粗糙度。因此,存在一个最佳的 AlN 隔离层厚度(1.5 nm 左右),此条件制备的样品 C 的二维电子气浓度和迁移率取得较高水平,同时样品 C 又具有较好的表面形貌。

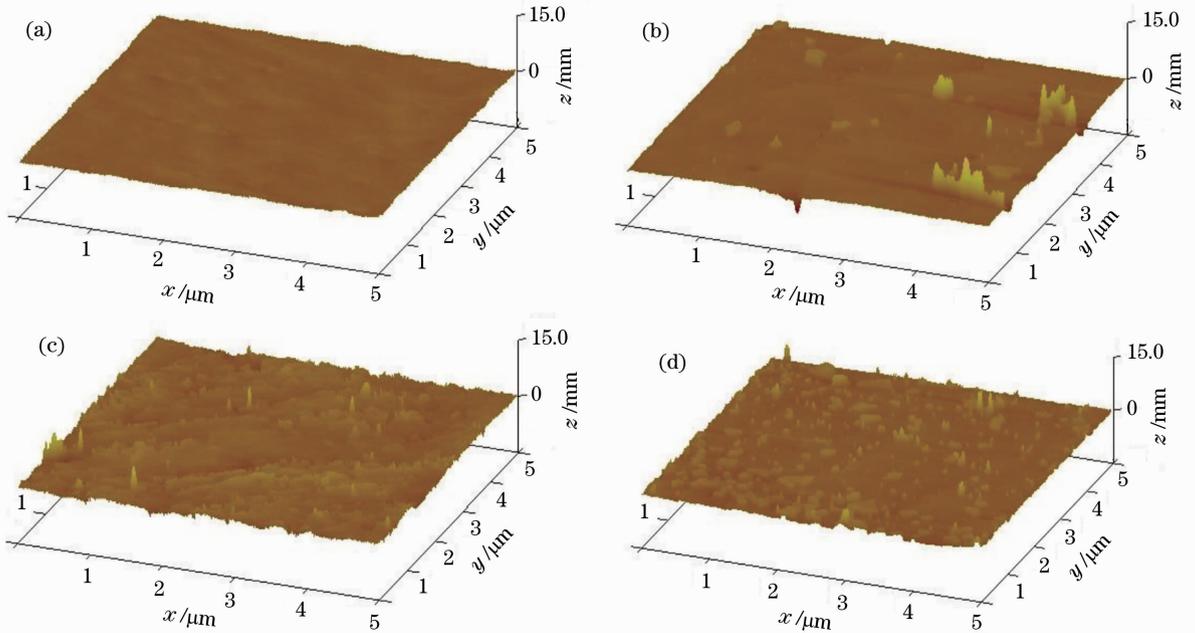


图 4 4 个实验样品的 AFM 表面形貌图。(a) A; (b) B; (c) C; (d) D

Fig. 4 AFM surface morphology of four samples. (a) A; (b) B; (c) C; (d) D

采用 HRXRD 的三轴晶系统对 4 个 HEMT 样品进行三轴晶联动扫描测试。根据 Vegard 定则<sup>[14]</sup>,可以得到 4 个样品  $Al_xGa_{1-x}N$  势垒层的固相 Al 组分为 24.3%,与实验设计的 Al 组分 25% 基本一致。图 5 为其中一个 HEMT 样品 C 的  $\omega-2\theta$  扫描测试曲线。从  $\omega-2\theta$  扫描测试曲线可以清楚地看

到 GaN(0002)和 AlGa<sub>N</sub>(0002)的衍射峰,衍射峰曲线也显示了 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 良好的异质界面。AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 异质界面质量好可以减小界面粗糙度散射和位错散射,提高二维电子气迁移率。 $\omega-2\theta$  扫描测试结果再次验证了样品 C 的二维电子气迁移率高得益于良好的 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 异质结 HEMT 结构。

## 4 结 论

对采用 MOCVD 方法制备的不同 AlN 隔离层厚度的 4 个 AlGa<sub>N</sub>/AlN/GaN 结构的 HEMT 材料的电学性能进行对比分析,研究了 AlN 隔离层对 HEMT 材料电学性能的影响。研究发现,AlN 隔离层的引入,增加了 AlGa<sub>N</sub> 势垒层与 GaN 沟道层之间的导带不连续性,在界面处形成的深势阱限制了电子在 GaN 沟道中,从而抑制了电子从 GaN 沟道穿透到 AlGa<sub>N</sub> 势垒层中。同时,AlN 隔离层的存在,很大程度上减小了  $Al_xGa_{1-x}N$  势垒层对二维电

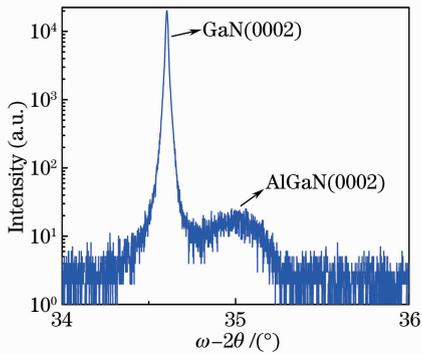


图 5 样品 C 的 HRXRD  $\omega-2\theta$  扫描测试曲线

Fig. 5 HRXRD spectra of triple-axis  $\omega-2\theta$  of the sample C

子气的合金无序散射作用,从而有效提高了 AlGaN/GaN 界面处的二维电子气浓度和迁移率。AlN 隔离层厚度在最佳左右(约 1.5 nm)时,制备的 HEMT 材料的二维电子气浓度和迁移率达到  $1.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  和  $1680 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、方块电阻低至  $310 \Omega$ ,体现了 HEMT 结构材料良好的电学性能。同时,从 AFM 和 HRXRD  $\omega-2\theta$  扫描测试结果表明,制备的 HEMT 具有较好的表面形貌和异质结界面。

### 参 考 文 献

- 1 Ren Chunjiang, Li Zhonghui, Jiao Gang *et al.*. 4 W/mm AlGaN/GaN HEMTs grown on sapphire substrate [J]. *Research & Progress of SSE*, 2007, **27**(3): 320~324  
任春江,李忠辉,焦刚等. 4 W/mm 蓝宝石衬底 AlGaN/GaN HEMT [J]. *固体电子学研究与进展*, 2007, **27**(3): 320~324
- 2 Weijun Luo, Xiaoliang Wang, Hongling Xiao *et al.*. Growth and fabrication of AlGaN/GaN HEMT based on Si (111) substrates by MOCVD [J]. *Microelectronics Journal*, 2008, **39**(9): 1108~1111
- 3 Ding Guojian, Guo Liwei, Xing Zhigang *et al.*. Characterization of different-Al-content AlGaN/GaN heterostructures on sapphire [J]. *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2010, **53**(1): 49~53
- 4 Xue Junshuai, Hao Yue, Zhang Jincheng *et al.*. Improved electrical properties of the two-dimensional electron gas in AlGaN/GaN heterostructures using high temperature AlN interlayers [J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, **53**(6): 1567~1571
- 5 Zhao Guangyuan, Shikawa Hiroyasu, Egawa Takashi *et al.*. High-mobility AlGaN/GaN heterostructures grown on sapphire by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, **39**(3A): 1035~1038
- 6 T. Wang, M. Lachab, D. Nakagawa *et al.*. Investigation of two-dimensional electron gas in AlGaN/GaN heterostructures grown by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) [J]. *J. Crystal Growth*, 1999, **203**(3): 443~446
- 7 Xiaoliang Wang, Cuimei Wang, Guoxin Hu *et al.*. MOCVD-grown high-mobility AlGaN/AlN/GaN HEMT structure on sapphire substrate [J]. *J. Crystal Growth*, 2007, **298**(1): 791~793
- 8 Y. Kawakami, X. Q. Shen, G. Piao *et al.*. Improvements of surface morphology and sheet resistance of AlGaN/GaN HEMT structures using quasi AlGaN barrier layers [J]. *J. Crystal Growth*, 2007, **300**(1): 168~171
- 9 Y. Kawakami, A. Nakajima, X. Q. Shen *et al.*. Improved electrical properties in AlGaN/GaN heterostructures using AlN/GaN superlattice as a quasi-AlGaN barrier [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(24): 242112
- 10 Lian Ruikai, Li Lin, Fan Yaming *et al.*. Effects of AlN buffer layers thickness and Al pre-treatment on properties of GaN/Si (111) epilayer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2013, **40**(1): 0106001  
廉瑞凯,李林,范亚明等. 预镀 Al 及 AlN 缓冲层厚度对 GaN/Si(111)材料特性的影响 [J]. *中国激光*, 2013, **40**(1): 0106001
- 11 Makoto Miyoshi, Takashi Egawa, Hiroyasu Ishikawa. Study on mobility enhancement in MOVPE-grown AlGaN/AlN/GaN HEMT structures using a thin AlN interfacial layer [J]. *Solid-State Electronics*, 2006, **50**(9): 1515~1521
- 12 L. Hsu, W. Walukiewicz. Effect of polarization fields on transport properties in AlGaN/GaN heterostructures [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **89**(3): 1783~1789
- 13 Lu Dacheng, Duan Shukun. Basic and Applied Metalorganic Vapor Phase Epitaxy [M]. Beijing: Science Press, 2009. 208  
陆大成,段树坤. 金属有机化合物气相外延基础及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. 208
- 14 Cuimei Wang, Xiaoliang Wang, Guoxin Hu *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 [J]. *Applied Surface Science*, 2006, **253**(2): 762~765

栏目编辑: 韩峰