

# Si 衬底上 5.1W/mm 功率密度的 GaN HEMT

冯志宏<sup>†</sup> 尹甲运 袁凤坡 刘波 梁栋 默江辉 张志国 王勇  
冯震 李效白 杨克武 蔡树军

(专用集成电路国家级重点实验室, 石家庄 050051)

**摘要:** 利用 MOCVD 技术在 Si(111) 衬底上生长了高质量的 GaN HEMT 材料.  $1\mu\text{m}$  厚 GaN 外延层 XRD (002) 摇摆曲线半高宽  $573''$ , (102) 摇摆曲线半高宽  $668''$ . 通过插入层技术实现  $2\mu\text{m}$  厚 GaN HEMT 材料无裂纹, 室温二维电子气迁移率  $1350\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 方块电阻  $328\Omega/\square$ .  $1\text{mm}$  栅宽 GaN 微波功率器件饱和电流大于  $0.8\text{A}/\text{mm}$ , 跨导大于  $250\text{mS}/\text{mm}$ ,  $2\text{GHz}$  下最大连续波输出功率  $5.1\text{W}$ , 增益  $9.1\text{dB}$ , 附加效率达到  $35\%$ .

**关键词:** Si 衬底; GaN HEMT; XRD 半高宽; 二维电子气迁移率; 功率密度  
EEACC: 2560S; 0520F; 2560P

中图分类号: TN304 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)12-1949-03

## 1 引言

GaN 基宽禁带半导体材料在大功率微电子和光电子器件应用方面有着巨大的潜力. 现在所有 GaN 基器件通常都是以蓝宝石或 SiC 异质衬底为基础的. 但是从晶格匹配和热导特性上看, 蓝宝石还不是理想的异质外延衬底, 而 SiC 衬底与 GaN 之间虽然晶格失配小于蓝宝石衬底, 但其加工困难以及昂贵的价格也限制了该衬底的广泛应用. Si 衬底具有低成本、大尺寸和导热性好等优点, 且 Si 衬底 GaN 基材料及器件的研制将促进 GaN 基器件与传统 Si 基器件工艺的集成, Si 衬底 GaN HEMT 外延越来越引起人们的关注<sup>[1]</sup>.

由于 GaN 和 Si(111) 之间的晶格失配 (约 17%) 较大, 造成在 GaN 外延层中高的位错密度, 更重要的是 GaN 与 Si 的热膨胀系数差别达到 54%, 这会导致在降温过程中 GaN 材料受到较大的张应力而产生龟裂纹, 很难实现器件质量的 GaN 外延材料<sup>[2]</sup>. Feltin 等人<sup>[3]</sup> 在 GaN 外延层与 AlN 缓冲层之间采用 10 个周期的 AlN/GaN 超晶格作插入层, 生长出了没有裂纹的 GaN 晶体 ( $0.9\sim 2.5\mu\text{m}$ ). Krost 等人<sup>[4]</sup> 采用低温 AlN 插入层方法实现了  $3\mu\text{m}$  无微裂 GaN 层的 MOCVD 生长, XRD 的半高宽为  $400''$ . 最近他们又得到  $7\mu\text{m}$  厚无微裂 GaN 层, 几乎满足了所有器件应用的需要. 2004 年, 美国 Nitronex 公司在 Si 衬底上实现了  $12\text{W}/\text{mm}$  功率密度的 GaN 微波功率器件<sup>[5]</sup>, 目前已经实现部分商品化.

最近我们在 Si 衬底上生长了 GaN HEMT 材料, 并进行了器件制作, 本文对结果进行了报道.

## 2 实验

我们利用低压 MOCVD 系统进行样品生长. 用 TMGa、TMAI 和  $\text{NH}_3$  分别作为 Ga 源、Al 源和 N 源,  $\text{H}_2$  作为载气. 以高阻 Si(111) 作为衬底, 电阻率大于  $2000\Omega\cdot\text{cm}$ . 在生长过程中反应室的压力始终保持在  $200\text{mbar}$ . 生长前 Si 衬底采用传统的清洗工艺, 首先生长 AlN 缓冲层, 接着再高温生长 GaN 外延层. 我们使用插入层技术来实现厚 GaN 材料无裂纹. 然后在 GaN 层上面生长调制掺杂的 AlGaIn 势垒层, 厚度约  $20\text{nm}$ , Al 组分约为 30%.

GaN HEMT 器件使用  $1\text{mm}$  栅宽和  $0.4\mu\text{m}$  栅长, 使用台面隔离技术. 源漏欧姆接触使用电子束蒸发的 Ti/Al/Ni/Au, 然后在  $800^\circ\text{C}$  合金 60s. 采用电子束蒸发的 Ni/Au 作为栅金属. 最后, 使用等离子加强化学气相沉积 (PECVD) 系统沉积厚度约  $400\text{nm}$  的 SiN 钝化层.

我们使用 Bede QC200 型 X 射线衍射 (XRD) 仪对样品进行晶体质量和结构测试. 通过喇曼光谱对材料进行了应力分析. 采用范德堡 Hall 方法分别在室温和低温 (液氮) 对样品进行了二维电子气迁移率测量.

## 3 结果与讨论

图 1 为 Si 衬底上 GaN 外延材料表面的原子力

<sup>†</sup> 通信作者. Email: blueledviet@yahoo.com.cn  
2007-05-30 收到, 2007-06-28 定稿

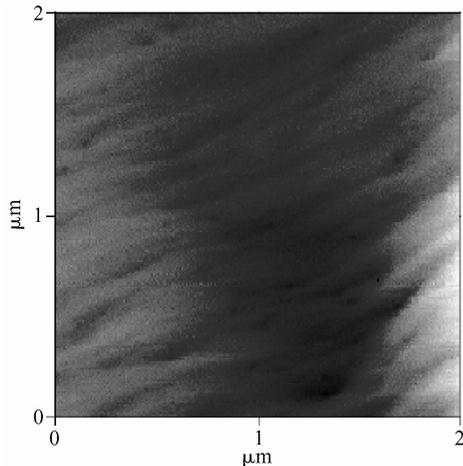


图 1 Si 衬底上 GaN 外延材料表面原子力显微镜 (AFM) 照片  
Fig.1 Surface AFM image of GaN epilayer grown on Si substrate

显微镜 (AFM) 照片, 扫描范围为  $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ . 图中能清晰看到 GaN 材料生长的原子台阶 (step flow), 同时也能看到很多混合位错 (mixed dislocation) 和螺旋位错 (screw dislocation) 点. Si 衬底和 GaN 之间存在大的晶格失配 (约 17%), 会导致 GaN 外延层高的缺陷密度, 一般大于  $10^{10}\text{cm}^{-2}$ , 由于不能观察到刃位错, 我们无法估计 GaN 的位错密度.

双晶 X 射线衍射 (DC-XRD) 半高宽是评价样品晶体质量最好的方法. 我们使用 Bede QC200 型 X 射线仪对样品进行了半高宽测试, 采用 (002) 和 (102) 两个衍射晶向来反应 GaN 平整度和位错密度.  $1\mu\text{m}$  厚 GaN 外延层 XRD (002) 摇摆曲线半高宽为  $573''$ , (102) 摇摆曲线半高宽为  $668''$  (如图 2 所示), 接近国际最好水平. 尤其是 (102) 摇摆曲线半高宽接近 (002) 摇摆曲线半高宽, 表明了 GaN 外延材料具有较好的晶体质量.

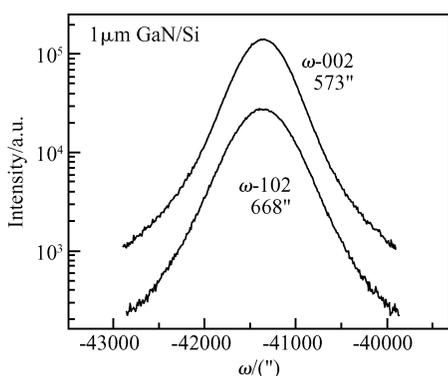


图 2 Si 衬底  $1\mu\text{m}$  厚 GaN 外延层 XRD (002) 和 (102) 摇摆曲线  
Fig.2 Rocking curves of XRD (002) and (102) of  $1\mu\text{m}$ -thick GaN epilayer grown on Si substrate

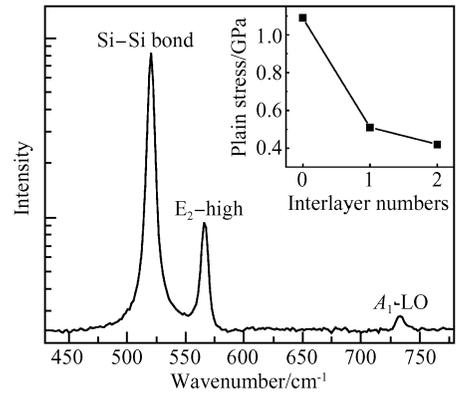


图 3 Si 衬底 GaN 外延层典型喇曼光谱 插图为 GaN 水平应力随插入层的变化.

Fig. 3 Typical Raman spectrum of GaN epilayer grown on Si substrate Inset shows the in-plane stress of GaN versus interlayer numbers.

由于 Si 衬底和 GaN 之间又存在大的热失配 (约 54%), 会导致厚的 GaN 外延层高的裂纹密度. 为了降低热应力对 GaN 材料的影响从而消除微裂纹, 我们采用插入层技术来实现 Si 衬底上厚 GaN 材料无裂纹生长. GaN 应力分析的最好办法就是采用喇曼光谱. 我们对样品进行了喇曼应力测试, 图 3 给出了典型的 Si 衬底上 GaN 的喇曼谱, 其中峰位在  $520.5\text{cm}^{-1}$  的最强峰对应的是 Si-Si 键, 峰位在  $565.7\text{cm}^{-1}$  的中间峰对应的是 GaN 的  $E_2\text{-high}$  峰 (无应力体 GaN 材料的  $E_2\text{-high}$  峰为  $568\text{cm}^{-1}$ ), 随着 GaN 水平应力的变化, GaN 材料的  $E_2\text{-high}$  峰会出现明显的偏移. 通过  $E_2\text{-high}$  的峰位移动, 根据公式我们可以计算出 GaN 的水平应力. 图 3 的插图给出了 GaN 的水平应力随插入层的变化. 水平应力从无插入层的  $1.09\text{GPa}$  降低到使用两个插入层的  $0.42\text{GPa}$ , 材料也从很多的裂纹到无裂纹. 应力补偿效应表明, 由于 AlN 插入层很薄, 生长时是弛豫的, 破坏了随后外延层的共格生长, 且由于 AlN 晶格常数比 GaN 的小, 在此弛豫过程中会引入压应力, 可有效补偿来自热失配所引起的张应力, 此压应力可以通过 AlN 生长温度和厚度来调整. 实验表明插入层技术可以有效降低 GaN 材料的应力并消除微裂纹.

采用范德堡 Hall 方法分别对样品在室温和低温下进行了二维电子气迁移率测量. 室温下二维电子气面密度为  $1.4 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ , 二维电子气迁移率达到  $1350\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , 对应的方块电阻为  $328\Omega/\square$ ,  $77\text{K}$  下二维电子气迁移率达到  $5900\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ , 方块电阻为  $79\Omega/\square$ , 表明了 Si(111) 衬底上好的 (Al)GaN 晶体质量和平整的 AlGaIn/GaN 界面, 这与 AFM 和 XRD 分析结果是一致的.

我们对  $1\text{mm}$  栅宽的 GaN 微波功率器件进行

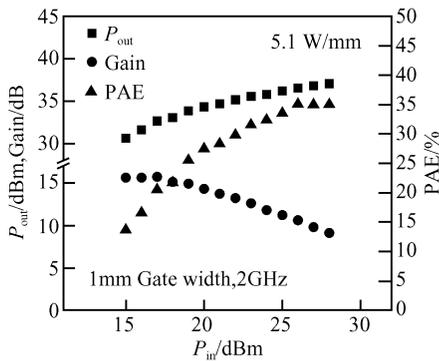


图 4 Si 衬底 1mm 栅宽 GaN 微波功率器件 2GHz 下大信号微波特征

Fig. 4 Large signal characteristics of 1mm-gate-width GaN microwave power device fabricated on Si substrate, measured at 2GHz

了直流和微波测试,如图 4 所示. 直流下饱和电流大于  $0.8\text{A}/\text{mm}$ ,跨导大于  $250\text{mS}/\text{mm}$ . 钝化后电流崩塌量仅有 2%. 同时在 2GHz 下对器件进行了微波测试,工作电压 25V,调制到最大输出功率 5.1W,增益 9.1dB,附加效率达到 35%,这是目前国内首次报道 Si 衬底上的 GaN HEMT 材料与器件.

## A 5.1W/mm Power Density GaN HEMT on Si Substrate

Feng Zhihong<sup>†</sup>, Yin Jiayun, Yuan Fengpo, Liu Bo, Liang Dong, Mo Jianghui, Zhang Zhiguo, Wang Yong, Feng Zhen, Li Xiaobai, Yang Kewu, and Cai Shujun

(National Key Laboratory of ASIC, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** High quality GaN HEMT materials were grown on Si (111) substrates by MOCVD. The FWHM of the XRD (002) rocking curve of the 1mm-thick GaN epilayer is  $573''$ , and the (102) is  $668''$ .  $2\mu\text{m}$ -thick crack-free GaN HEMT materials were achieved by the interlayer technique. The RT 2DEG mobility is  $1350\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  with a sheet resistance of  $328\Omega/\square$ . The DC and RF characteristics of a GaN microwave power device with a 1mm gate width were probed. The saturated drain current density is around  $0.8\text{A}/\text{mm}$ , and the peak transconductance is beyond  $250\text{mS}/\text{mm}$ . Tuning for a maximum output power of 5.1W at 2GHz, a gain of 9.1dB, and a peak power-added efficiency of 35% was obtained.

**Key words:** Si substrate; GaN HEMT; FWHM of XRD; 2DEG mobility; power density

**EEACC:** 2560S; 0520F; 2560P

**Article ID:** 0253-4177(2007)12-1949-03

## 4 结论

实现了 Si 衬底上高质量的 GaN HEMT 材料和器件.  $2\mu\text{m}$  厚 GaN HEMT 材料无裂纹,室温二维电子气迁移率达到  $1350\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ . 1mm 栅宽 GaN 微波功率器件饱和电流大于  $0.8\text{A}/\text{mm}$ , 2GHz 下达到 5.1W/mm 功率密度,增益 9.1dB,附加效率达到 35%.

## 参考文献

- [1] Vescan A, Brown J D, Johnson J W, et al. AlGaIn/GaN HFETs on 100mm silicon substrates for commercial wireless applications. *Phys Status Solidi C*, 2002, 0(1):52
- [2] Pal S, Jacob C. Silicon-a new substrate for GaN growth. *Bull Mater Sci*, 2004, 27(6):501
- [3] Feltin E, Beaumont B, Laügt M, et al. Stress control in GaN grown on silicon (111) by metalorganic vapor phase epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(20):3230
- [4] Krost A, Dadgar A, Strassburger G, et al. GaN-based epitaxy on silicon: Stress measurements. *Phys Status Solidi A*, 2003, 200(1):26
- [5] Johnson J W, Piner E L, Vescan A, et al. 12W/mm AlGaIn-GaN HFETs on silicon substrates. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, 25(7):459

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: blueledviet@yahoo.com.cn

Received 30 May 2007, revised manuscript received 28 June 2007