

# GaN 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结的高温性质\*

王茂俊 沈波<sup>†</sup> 王彦 黄森 许福军 许谏 杨志坚 张国义

(北京大学物理学院 人工微结构与介观物理国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 通过高温 Hall 测量研究了 GaN 和  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  异质结从室温到 500°C 高温下的输运性质. 实验发现 GaN 背景载流子浓度随着温度的升高而升高, 载流子浓度变化的幅度和 GaN 的位错密度存在正比关系, 持续光电导的跃迁幅度和 GaN 的位错密度也存在正比关系, 说明位错相关的深施主或者陷阱对 GaN 在高温下的背景浓度有很大影响. 实验发现  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  异质结中二维电子气的浓度在室温到 250°C 的范围内随着温度的升高而下降, 然后随着温度的升高开始增加. 前者主要是由于随着温度的升高,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  异质结的导带不连续减小引起的, 后者主要是由 GaN 层背景载流子浓度增加导致的. 通过求解自洽的薛定谔和泊松方程得到的二维电子气浓度的温度关系和实验结果一致.

**关键词:** GaN;  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  异质结; 位错; Hall; 高温

**PACC:** 7280E; 7360L

**中图分类号:** O472<sup>+</sup>.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0376-03

## 1 引言

宽禁带半导体材料 GaN 具有较大的载流子饱和速度及高击穿电场, 基于 GaN 的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  异质结由于存在强的自发极化和压电极化电场, 在  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  界面易于形成高浓度的二维电子气(2DEG), 并且拥有较高的电子迁移率. 因此 GaN 基的高迁移率晶体管(HEMT)在微波大功率器件应用方面有较强的优势, 成为国内外研究的热点<sup>[1~3]</sup>. 由于 HEMT 常常工作在高功率、高温的条件下, 因此器件在高温下的稳定性非常重要. 除了肖特基接触和欧姆接触在高温下的退化外, GaN 层的背景载流子浓度以及  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  中 2DEG 浓度的变化都会极大地影响到器件的性能. 因此研究 GaN 和  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  异质结在高温下的输运性质是十分必要的.

## 2 实验

实验采用金属有机化学气相沉积系统(MOCVD), 以三甲基镓和氨气分别作为 Ga 源和 N 源, 以高纯  $\text{H}_2$  作为载气, 在 C 面蓝宝石衬底上生长. 首先, 在 530°C 生长一层 GaN 成核层, 然后在 1070°C 接着生长 2.2  $\mu\text{m}$  厚的非故意掺杂 GaN 层(i-GaN). 然后在 1100°C 生长 20nm 厚的非故意掺杂  $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$  层. 高分辨 X 光衍射(XRD)显示晶体

拥有良好的质量. 样品被切成 5mm × 5mm 的方块, 磁控溅射 Ti/Al/Ni/Au (25nm/120nm/45nm/50nm)4 层金属形成范德堡 Hall 测试图形, 然后在 850°C,  $\text{N}_2$  气氛下快速退火 30s, 形成良好的欧姆接触. 高温 Hall 测量采用 Accent HL5500 霍尔测量系统加上 Accent HL5590 高温台. 测试温度范围从室温到 500°C. 安捷伦 4155C 半导体参数测试仪用来测量持续光电导(PPC)的电流, 偏压为 2V, 蓝光发光二极管用作激发光源. 在 PPC 测量之前, 样品在黑暗中保持 5h, 以保证实验条件的一致性.

## 3 结果与讨论

图 1 显示了 A, B, C 3 块 i-GaN 样品从室温到 500°C 时载流子浓度的变化随温度的关系. A, B, C 3 块样品在室温下的背景载流子浓度都在  $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  左右. 从图中可以看出, i-GaN 的背景载流子浓度随着温度的升高而升高, 但变化的幅度却有很大差别. 样品 A 的背景载流子浓度随着温度的升高缓慢上升, 而样品 C 的背景载流子浓度随着温度的升高变化最大. 图 2 显示了 3 块样品的 PPC 的激发和衰减过程. 在光照之前通过样品的暗电流被归一化为 1, 曲线拟合显示 3 块样品的衰减时间常数没有明显区别, 但光电流的跃迁幅度有很大差别, 样品 A 的跃迁幅度最小, 样品 C 最大. 这说明 3 块样品中的深能级或缺陷属于同种类型, 但能级或缺陷密

\* 国家自然科学基金(批准号:60325413), 国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB604908), 教育部科技创新工程重大项目培育基金(批准号:705002)和北京市自然科学基金(批准号:4062017)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: bshen@pku.edu.cn

2006-11-30 收到, 2006-12-11 定稿

度存在很大差异.

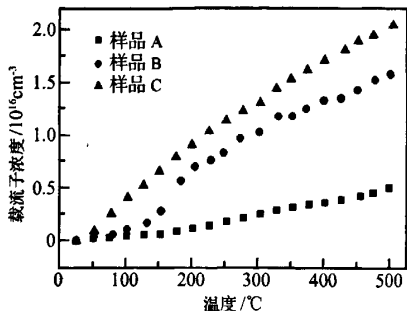


图 1 i-GaN 背景浓度和温度的变化曲线

Fig.1 Temperature dependence of the increased electron concentration in samples, A, B and C

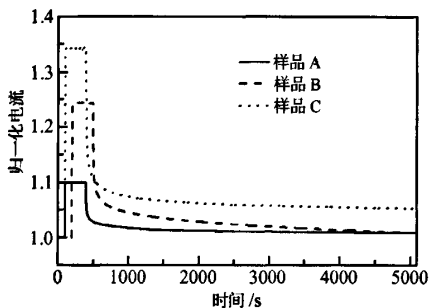


图 2 i-GaN 的持续光电导变化曲线

Fig.2 Typical buildup and decay behaviors of persistent photoconductivity of unintentionally doped GaN layers .

MOCVD 生长的 i-GaN 一般是 n 型. 一般认为 n 型背景主要来源于氮空位 ( $V_N$ )<sup>[4,5]</sup>. 但最近的理论计算表明 n 型 GaN 中  $V_N$  的形成能大约是 4eV, 大于镓空位 ( $V_{Ga}$ ). 最可能的施主是占据 N 位的氧 ( $O_N$ ) 或者占据 Ga 位的 Si ( $Si_{Ga}$ ). 另外实验已经证明 O 在 GaN 中表现为浅施主, 激活能在 4~10meV 范围内<sup>[6]</sup>. 但是上述施主都是浅施主, 施主浓度低于  $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  时在室温下大部分都已经离化了. 因此在温度升高以后, 它们对背景载流子浓度的贡献应该很小. 温度升高以后, 费米能级将下降. 因此更深的能级或缺陷中的电子将被激发出来, 导致背景载流子浓度的增加. 但这些深能级或陷阱的形成机制却不是很清楚. 前人的工作显示 GaN 中的主要陷阱倾向于包围在位错周围<sup>[7]</sup>, 理论计算也表明 GaN 中的位错在禁带中形成数个能级<sup>[8]</sup>.

我们通过拟合 GaN 的 (0002), (10 $\bar{1}$ 3), (10 $\bar{1}$ 2), (10 $\bar{1}$ 1) 和 (20 $\bar{2}$ 1) 面的 XRD 摇摆曲线的半高宽 (FWHM) 来得到 GaN 结构的 tilt 角和 twist 角, 然后计算得到位错密度. 计算得到样品 A 的螺型位错和刃型位错的密度是  $8.55 \times 10^7$  和  $9.50 \times$

$10^8 \text{cm}^{-2}$ , 样品 B 对应的位错密度是  $9.79 \times 10^7$  和  $1.24 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ , 样品 C 是  $1.97 \times 10^8$  和  $1.49 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ . 可以看出样品 A 的位错密度最低, 样品 C 最高. 因此, i-GaN 中的深能级或陷阱的密度和位错密度有着直接的正比关系, 并且导致了载流子浓度的温度关系和 PPC 跃迁幅度的差异.

图 3 显示了 Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N/GaN 异质结中 2DEG 的浓度和迁移率随温度的变化曲线. 可以看出, 2DEG 的浓度的温度关系呈“V”字形. 从室温到 250℃, 2DEG 的浓度随着温度的升高而降低, 而大于 250℃ 时, 2DEG 的浓度随着温度的升高而升高.

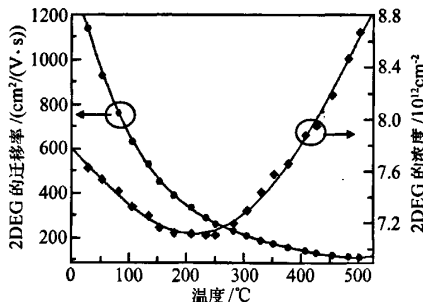


图 3 2DEG 的浓度和迁移率的温度变化曲线

Fig.3 Temperature dependence of the mobility and density of the 2DEG in an Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N/GaN heterostructure

Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N/GaN 异质结由于 Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N 和 GaN 的晶格失配, Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N 层处于张应变状态, 压电极化方向指向衬底, 加上 Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N 的自发极化大于 GaN 的自发极化, 且和压电极化的方向相同, 因此在异质界面存在高密度的正极化电荷, 形成很强的极化电场, 导致了 Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N/GaN 异质结构能带结构的弯曲. 另外由于 Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N 的禁带宽度大于 GaN, 形成了导带不连续. 两者导致异质界面形成一个三角阱, 形成了 2DEG. 一般认为, 极化电场和导带不连续的大小决定了 2DEG 的浓度. 随着温度的升高, Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N 和 GaN 的禁带宽度都会减小<sup>[9]</sup>. Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N 的禁带宽度通过 GaN 和 AlN 的禁带宽度的温度关系拟合得到. 从室温到 250℃, Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N/GaN 异质结的导带不连续从 0.251 下降到 0.243eV<sup>[9]</sup>.

通过求解自洽的泊松方程和薛定谔方程, 可以计算得到 2DEG 的浓度随温度的变化曲线, 其中考虑了导带不连续的温度变化. 图 4 显示了计算得到的 2DEG 的浓度随温度的变化曲线. 可以看出随着温度的升高, 2DEG 的浓度开始下降, 这主要是由于导带不连续的降低引起的. 400℃ 时 2DEG 浓度的跃变主要是由于计算过程中 2DEG 子带占据的变化引起的, 在这里不详细讨论. 实验中温度大于

250°C 时测得的 2DEG 浓度随温度的升高主要是由于 GaN 的背景载流子浓度的升高引起的。

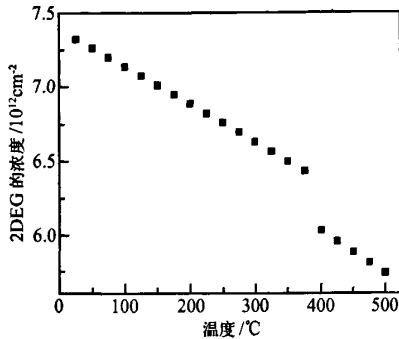


图 4 计算得到的 2DEG 浓度随温度的变化曲线

Fig. 4 Calculated temperature dependence of the 2DEG density in an  $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$  heterostructure

## 4 总结

通过高温 Hall 测量研究了 GaN 和  $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$  异质结的高温输运性质. 发现 GaN 在高温下的背景载流子浓度和 GaN 的位错密度密切相关, 位错在禁带中导致了一系列的深能级或缺陷.  $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$  异质结中 2DEG 的浓度在室温到 250°C 的范围内随温度的升高而减小, 大于 250°C 时又随温度的升高而升高, 前者主要是由于随

着温度的升高, 异质结的导带不连续的降低引起的, 后者主要是由于 GaN 层的背景载流子浓度的增加导致的, Hall 测量时反映在 2DEG 浓度的升高上.

## 参考文献

- [1] Eastman L F, Tilak V, Smart J, et al. Undoped AlGaIn/GaN HEMTs for microwave power amplification. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48: 479
- [2] Wu Y F, Ibbetson J P, Parikh P, et al. Very-high power density AlGaIn/GaN HEMTs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48: 586
- [3] Egawa T, Zhao G Y, Ishikawa H, et al. Characterizations of recessed gate AlGaIn GaN HEMTs on sapphire. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48: 603
- [4] Maruska H P, Tietjin J J. The preparation and properties of vapor-deposited single-crystal-line GaN. *Appl Phys Lett*, 1969, 15: 327
- [5] Ilengems M, Montgomery H C. Electrical properties of n-type vapor-grown gallium nitride. *J Phys Chem Solids*, 1973, 34: 885
- [6] Di Forte-Poisson M A, Huet F, Romann A, et al. Relationship between physical properties and gas purification in GaN grown by metalorganic vapor phase epitaxy. *J Cryst Growth*, 1998, 195: 314
- [7] Fang Z Q, Look D C, Polenta L. Dislocation-related electron capture behaviour of traps in n-type GaN. *J Phys: Condens Matter*, 2002, 14: 13061
- [8] Lee S M, Belkhir M A, Zhu X Y, et al. Electronic structures of GaN edge dislocations. *Phy Rev B*, 2000, 61: 16033
- [9] Nepal N, Li J, Nakarmi M L, et al. Temperature and compositional dependence of the energy band gap of AlGaIn alloys. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 242104

## High Temperature Performance of GaN and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Heterostructures\*

Wang Maojun, Shen Bo<sup>†</sup>, Wang Yan, Huang Sen, Xu Fujun, Xu Jian, Yang Zhijian, and Zhang Guoyi

(State Key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Temperature dependence of the transport characteristics of GaN and  $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$  heterostructures are investigated by means of high temperature Hall measurements from room temperature to 500°C. The increment of electron concentration in GaN layer is found to be direct proportion to the density of dislocations in GaN layer. It is found that the 2DEG density decreases with increasing temperature from room temperature to 250°C, and then changes to increase with increasing temperature at higher temperatures. It is thought that the decrease of the 2DEG density from room temperature to 250°C is caused by the reduction of the conduction band offset at high temperatures. The result is consistent with the theoretical calculation.

**Key words:** GaN;  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ; dislocation; Hall; high temperature

**PACC:** 7280E; 7360L

**Article ID:** 0253-4177(2007)S0-0376-03

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60325413), the National Basic Research Program of China (No. 2006CB604908), the Cultivation Fund of the Key Scientific and Technical Innovation Project, Ministry of Education of China (No. 705002), and the Beijing Natural Science Foundation (No. 4062017)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: bshen@pku.edu.cn

Received 30 November 2006, revised manuscript received 11 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics