

文章编号:1673-9981(2014)03-0165-04

## AlN/蓝宝石模板上与 GaN 近晶格匹配 InAlN 薄膜的研究\*

张康<sup>1</sup>, 张娜<sup>1</sup>, 张志清<sup>1</sup>, 刘宁炆<sup>1</sup>, 王君君<sup>1</sup>, 赵维<sup>1</sup>, 范广涵<sup>1</sup>, 陈志涛<sup>1</sup>, 江川孝志<sup>2</sup>

1. 广东省工业技术研究院(广州有色院金属研究院), 广东 广州 510650;  
2. 日本名古屋工业大学纳米器件与系统研究中心, 名古屋市 4660061

**摘要:**采用 MOCVD 方法在 AlN/蓝宝石模板上生长了与 GaN 近晶格匹配的高质量 InAlN 薄膜, 并对其结构及表面特性进行了研究. 结果表明, X 射线衍射 (20-24) 面的倒易空间图表明, InAlN 薄膜的晶格常数与 GaN 面的相匹配; (002) 和 (102) 面的  $\omega$  摇摆曲线测试表明, InAlN 薄膜的晶体质量高, 半峰宽值分别低于 100" 和 248"; 通过扫描电子显微镜 (SEM) 分析发现, InAlN 薄膜表面平整, 仅存在少量位错坑; X 射线能谱面扫描图 (EDX 映射) 结果显示, 除位错坑附近外, 在薄膜其它区域内 Al 和 In 元素分布均匀.

**关键词:** InAlN 薄膜; GaN; 近晶格匹配

**中图分类号:** TG113 **文献标识码:** A

三族氮化物材料 GaN, InN, AlN 及其合金体系, 被广泛应用于光电子器件和功率电子器件领域中, 如发光二极管 (LED)、高电子迁移率晶体管 (HEMT) 等<sup>[1-2]</sup>. 当 InAlN 中 In 的摩尔分数接近 0.18 时, 可实现与 GaN 面晶格常数匹配<sup>[3]</sup>, 从而有望获得高质量的 InAlN/GaN 异质结材料. 此外, InAlN 还具有宽禁带和高折射率等优点<sup>[4-5]</sup>, 这些特征使其在应用中具有优势. 然而, 由于 In-N 和 Al-N 化合键的键能等性质差异大, 使得高质量 InAlN 材料的生长窗口小、难度大, 近年来随着材料生长技术的不断进步, InAlN 的生长已取得突破性进展<sup>[6]</sup>. 基于 In<sub>0.18</sub>Al<sub>0.82</sub>N/GaN 的多种高性能光电器件和电子器件性能的进一步提升依赖于 InAlN 材料质量的不断提高, 因此如何获得高质量 InAlN 材料, 对其器件应用及发展具有重要意义.

本文采用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 法, 在 AlN/蓝宝石模板上生长了 InAlN 薄膜材料, 同时对薄膜的性能进行了测试及分析.

## 1 实验部分

研究的 InAlN 薄膜试样是在 AlN/蓝宝石模板上采用 MOCVD 方法生长的, 实验使用的 MOCVD 设备为大阳日酸株式会社生产的 SR2000 系列的 MOCVD 系统. 在材料生长过程中, 使用三甲基镓作 Ga 源、三甲基铝作 Al 源、三甲基铟作 In 源、氨气作 N 源. 首先在 AlN/蓝宝石模板上先生长一层厚 2  $\mu\text{m}$  的 GaN 薄膜, 然后再生长一层厚约 100 nm 的 InAlN 薄膜, 薄膜生长温度为 800  $^{\circ}\text{C}$ , 外延结构如图 1 所示.

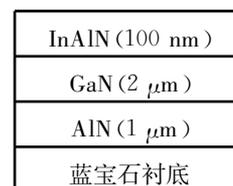


图 1 外延结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the epitaxial structure

收稿日期: 2013-11-16

\* 基金项目: 广东省战略性新兴产业 LED 专项 (2010A081001001, 2011A081301003, 2012A080301003, 2012A080302002); 广州市应用基础研究项目 (2013J4100014)

作者简介: 张康 (1987-), 男, 安徽池州人, 助理工程师, 硕士.

实验中使用荷兰帕纳科公司生产的 Xpert PRO 系列 X 射线衍射仪,对 InAlN 薄膜试样进行高分辨的 X 射线衍射(XRD)图谱测试;用扫描电子显微镜(SEM),分析 InAlN 薄膜试样的表面;用透射电子显微镜,对 InAlN 薄膜试样进行 X 射线能谱面扫描分析(EDX mapping)。

## 2 结果与分析

图 2 为试样的 XRD 图,其中图 2(a)为试样的

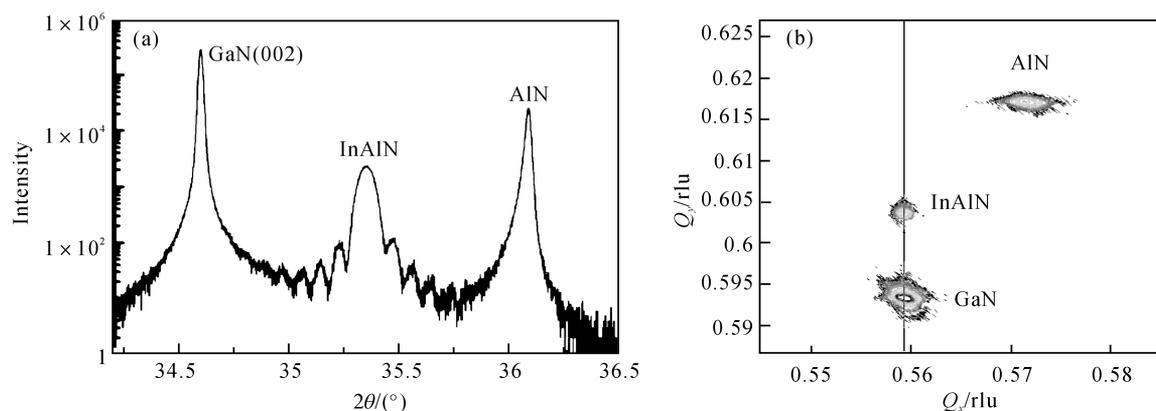


图 2 试样的 XRD 图

(a)XRD (0002)的  $2\theta\omega$ 扫描曲线;(b)XRD(20-24)面的倒易空间图

Fig.2 XRD patterns of samples

(a) XRD (0002)  $2\theta\omega$  scan rocking curves; (b) reciprocal space maps around (20-24)

对于六方结构的三族氮化物外延材料来说, XRD 摇摆曲线的半峰宽通常用来评价材料的晶体质量,特别是材料的线位错密度,半峰宽值越大,反映位错密度越高,反之亦然<sup>[8]</sup>.图 3 为 InAlN 薄膜试样的 XRD(002)和(102)面的  $\omega$ 扫描摇摆曲线,其中(002)面的摇摆曲线的半峰宽反映材料的螺位错密度,(102)面的摇摆曲线的半峰宽反映刃位错密度.从图 3 可见,对称面(002)的摇摆曲线半峰宽为  $100''$ ,非对称面(102)的摇摆曲线半峰宽为  $248''$ .根据(002)面的  $\omega$ 扫描摇摆曲线,计算出材料的螺位错密度为  $5.2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ <sup>[9]</sup>,表明 InAlN 薄膜的位错密度低、晶体质量高。

图 4 为 InAlN 薄膜的表面形貌图.图 4(a)为在 AlN/蓝宝石模板上生长的与 GaN 晶格匹配的 InAlN 薄膜表面的 SEM 形貌图,从图 4(a)可见,在 InAlN 生长过程中,在材料表面会出现 V 形坑(图中黑点处).经研究发现<sup>[10-11]</sup>,V 形坑仅与螺位错

XRD(0002)面的  $2\theta\omega$ 扫描曲线,图 2(b)为试样的 XRD(20-24)面的倒易空间图.从图 2(a)可见,有明显的三个峰,分别对应 AlN, GaN 和 InAlN,其中 InAlN 峰两边有清晰的条纹出现,说明 InAlN 和 GaN 材料之间有突变界面<sup>[7]</sup>.从图 2(b)可见,竖线为 InAlN 外延和 GaN 基板的倒易晶格点(RLP)的连线方向,其平行于纵轴方向,表明 InAlN 薄膜的晶格常数与 GaN 基板面的晶格常数是匹配的。

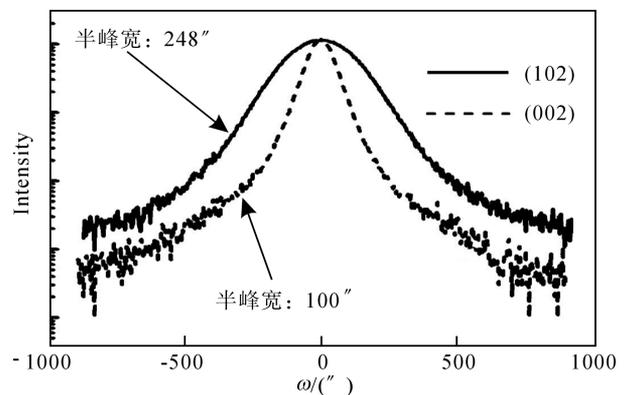


图 3 InAlN 薄膜的 XRD(0002)和(10-12)面  $\omega$ 扫描摇摆曲线  
Fig.3 XRD  $\omega$ -scans rocking curves around (002) and (102) of InAlN film

(混合位错和纯螺位错)相关,一般 V 形坑都起源于混合位错的顶端,而与纯刃位错无关.通过计算可以得到露头螺位错密度为  $2.4 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ,其与 XRD 计算的螺位错密度比较吻合.图 4(b)为在传统蓝宝石

石衬底上生长的与 GaN 晶格匹配的 InAlN 薄膜的 SEM 扫描图.从图 4(b)可见,InAlN 薄膜表面的螺位错露头数目较 AlN/蓝宝石模板生长的 InAlN 薄膜的明显增多,计算得到的露头螺位错密度为

$1.0 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ ,这表明生长在 AlN/蓝宝石模板上的 InAlN 薄膜的晶体质量比直接在蓝宝石衬底上生长的更好.

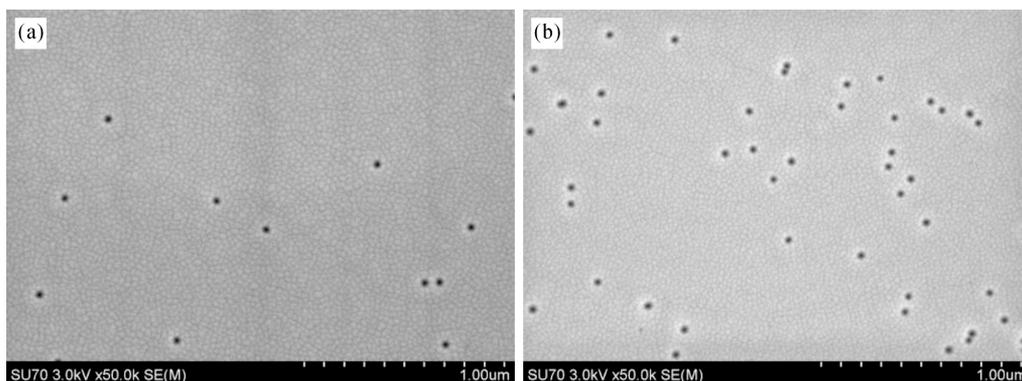


图 4 InAlN 表面形貌图

(a)AlN/蓝宝石模板;(b)蓝宝石衬底

Fig.4 Surface morphology of InAlN

(a)AlN/sapphire template;(b)sapphire substrate

图 5 为 InAlN 薄膜的 EDX 映射图.从图 5 可见,在 Al 和 In 元素的映射图中,箭头指向位置有明显的黑点,这些黑点为薄膜中与位错相关的 V 形坑

位置,在这些坑之外的其余区域,在仪器可探测的范围内没有观察到 Al 和 In 元素凝聚的现象.表明,薄膜中这两种元素分布均匀.

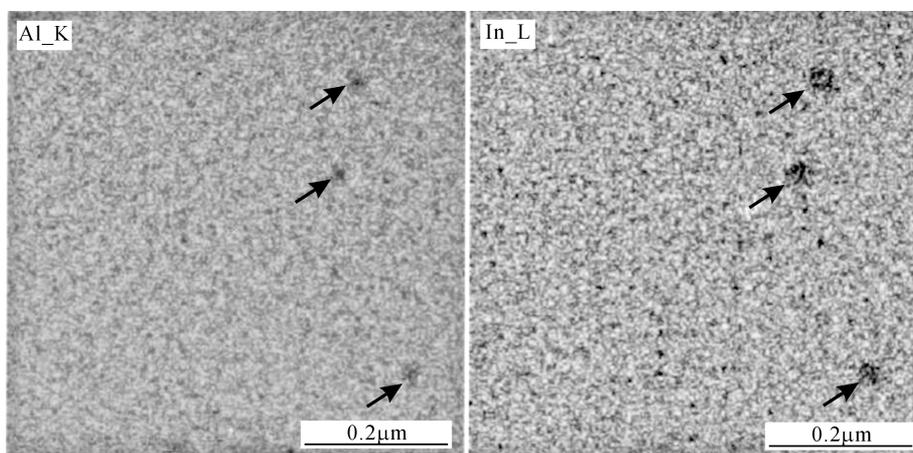


图 5 InAlN 薄膜 Al 元素和 In 元素的 EDX 映射图

Fig.5 EDX mapping of Al element and In element in InAlN film

### 3 结 论

采用 MOCVD 方法在 AlN/蓝宝石模板上生长了 InAlN/GaN 薄膜.结果表明:InAlN 薄膜的晶格

常数与 GaN 面的晶格常数相匹配;InAlN (002)和 (102)面的 XRD 摇摆曲线的半峰宽分别低达  $100''$  和  $248''$ ,表明 InAlN 薄膜的位错密度低、晶体质量高;EDX 映射结果显示,在薄膜中 Al 和 In 元素分布均匀.

## 参考文献:

- [1] NAKAMURA S. The roles of structural imperfections in InGaN-based light-emitting diodes and laser diodes [J]. *Science*, 1998, 281: 956-961.
- [2] WU Y F, SAXLER A, MOORE M, et al. 30 W/mm GaN HEMTs by field plate optimization [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2004, 25 (3): 117-119.
- [3] LORENZ K, FRANCO N, ALVES E, et al. Anomalous ion channeling in AlInN/GaN bilayers: determination of the strain state [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97: 085501-085501-4.
- [4] CARLIN J F, ILEGEMS M. High-quality AlInN for high index contrast bragg mirrors lattice matched to GaN [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(4): 668-670.
- [5] CARLIN J F, ZELLWEGER C, DORSAZ J, et al. Progresses in III-nitride distributed bragg reflectors and microcavities using AlInN/GaN materials [J]. *Physica Status Solidi B*, 2005, 242: 2326-2344.
- [6] BUTTE R, CARLIN J F, FELTIN E, et al. Current status of AlInN layers lattice-matched to GaN for photonics and electronics [J]. *Journal of Physics D*, 2007, 40(20): 6328-6344.
- [7] CHEN Z T, TAN S X, SAKAI Y, et al. Improved performance of InAlN-based schottky solar-blind photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94 (21): 213504-213504-3.
- [8] HEYING B, WU X, KELLER H S, et al. Role of threading dislocation structure on the x-ray diffraction peak widths in epitaxial GaN films [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(5): 643-645.
- [9] CHEN Z T, XU K, GUO L P, et al. Effect of long anneals on the densities of threading dislocations in GaN films grown by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2006, 294 (2): 156-161.
- [10] SADLER T C, KAPPERS M J, OLIVER R A. The effect of temperature and ammonia flux on the surface morphology and composition of  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  epitaxial layers [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, 311 (12): 3380-3385.
- [11] MIAO Z L, YU T J, XU F J, et al. The origin and evolution of V-defects in  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$  epilayers grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(23): 231909-231909-3.

## Investigation of InAlN film near lattice-matched to GaN grown on AlN/sapphire templates

ZHANG Kang<sup>1</sup>, ZHANG Na<sup>1</sup>, ZHANG Zhiqing<sup>1</sup>, LIU Ningyang<sup>1</sup>, WANG Junjun<sup>1</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>,  
FAN Guanghan<sup>1</sup>, CHEN Zhitao<sup>1</sup>, EGAWA Takashi<sup>2</sup>

1. *Guangdong General Research Institute of Industrial Technology (Guangzhou Research Institute of Nonferrous Metals), Guangzhou 510650, China*; 2. *Research Center for Nano-Device and System, Nagoya Institute of Technology, Nagoya 4660061, Japan*

**Abstract:** High-quality InAlN near lattice-matched (LM) to GaN has been grown on AlN/sapphire templates by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD), and characterized by X-ray diffraction (XRD), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and scanning electron microscope (SEM). Results show that InAlN is lattice matched to GaN indicated by XRD mapping measurements (20-24), and  $\omega$ -scanning rocking curve measurements indicate the high quality of InAlN with the full width at half maximums (FWHMs) of (002) and (102) being as low as 100 and 248 arcsec, respectively. SEM mappings of InAlN surface show some V-pits distribution. EDX measurements indicate homogeneously special distribution of Al and In.

**Key words:** InAlN film; GaN; near lattice-matched