

($\bar{1}\bar{1}02$) r 面蓝宝石生长的($11\bar{2}0$) a 面氮化镓研究

许晟瑞, 段焕涛, 郝跃, 张进城,
张金凤, 倪金玉, 胡仕刚, 李志明

(西安电子科技大学 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 自发极化和压电极化是氮化镓制作光电器件没有解决的问题, 对非极性 GaN 材料的研究解决了极化现象. 采用低温 AlN 作为缓冲层, 在 ($\bar{1}\bar{1}02$) r 面蓝宝石和 (0001) c 面蓝宝石上分别生长了 ($11\bar{2}0$) 非极性 a 面和 (0001) 极性 c 面 GaN, 用原子力显微镜和高分辨 X 射线衍射、光致发光谱比较了生长在 r 面蓝宝石上的 a 面 GaN 和 c 面蓝宝石上的 c 面 GaN, a 面 GaN 材料质量和 c 面 GaN 相差较大, 在 a 面 GaN 上发现了三角坑的表面形貌, 这和传统的 c 面生长的极性 GaN 截然不同. 对 a 面 GaN 的缺陷形成原因进行了讨论, 并且确定了三角坑缺陷的晶向.

关键词: 缺陷; 氮化镓; X 射线衍射; 非极性

中图分类号: TN325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)06-1049-04

Study of ($11\bar{2}0$) non polar a -plane GaN on the ($\bar{1}\bar{1}02$) r -plane sapphire

XU Sheng-ruì, DUAN Huan-tao, HAO Yue, ZHANG Jin-cheng,
ZHANG Jin-feng, NI Jin-yu, HU Shi-gang, LI Zhi-ming
(Ministry of Education Key Lab. of Wide Band-Gap Semiconductor Materials
and Devices, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: The spontaneous and piezoelectric polarization represent one of the unsolved problems in utilizing GaN for fabricating light-emitting devices. To solve the problem, non-polar GaN structures have been studied. Low-temperature AlN buffers are used for ($11\bar{2}0$) a -plane GaN growth on the ($\bar{1}\bar{1}02$) r -plane sapphire. A combination of atomic force microscopy (AFM), high resolution X-ray diffraction (XRD) and photoluminescence (PL) spectrum is used to characterize dislocation of the ($11\bar{2}0$) a -plane and (0001) c -plane GaN epilayer. Compared with the typical hexagonal dislocation of c -plane GaN, this shows great difference with the conventional polar GaN, and the pit of the a -plane GaN epilayer is triangle, with the possible formation mechanisms of these faults discussed and the triangular pit directions also investigated.

Key Words: dislocation; GaN; X-ray diffraction; nonpolar

作为化合物半导体微波功率器件的 GaAs MESFET, 在过去 20 多年的发展中几乎已经使其性能达到了材料的极限. 20 世纪 80 年代初 GaAs MESFET 的最高输出功率已达到 1.4 W/mm (在 8 GHz 时). 虽然后来人们不断尝试各种方法提高其性能, 但是功率密度的提高非常有限, 最高功率密度只达到 1.57 W/mm (在 1.1 GHz 时), 而且这是在牺牲工作频率的情况下获得的.

宽禁带氮化物半导体氮化镓 (GaN) 和氮化铝 (AlN) 在实验和理论上得到普遍的重视, 它们具有独特的性质, 如高电子迁移率、宽能隙和稳定的温度特性, 使它们可用于工作波段从蓝光到紫光的激光器、发光二极管以及高温光电器件, 有着巨大潜在的应用前景和市场. 而低维半导体材料制备技术分子束外延 (MBE) 及

收稿日期: 2008-09-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助 (60736033); 973 计划项目资助 (513270407)

作者简介: 许晟瑞 (1981-), 男, 西安电子科技大学博士研究生, E-mail: shengruixidian@126.com.

金属有机物化学气相沉积(MOCVD)的发展与成熟,进一步推动了人们对 GaN 材料的研究^[1-2].

但是,GaN 薄膜通常是沿着其极性轴(也就是 c 轴)生长的,由自发极化和压电效应而产生的强大的内建电场大大地降低了发光效率,内建电场的存在使能带弯曲、倾斜,能级位置发生变化,发光波长发生蓝移.同时由界面电荷产生的电场还会使正负载流子在空间上分离,电子与空穴波函数的交迭变小,使材料的发光效率大大地降低.避开极化效应的最根本方法是生长非极性面的 GaN 基材料,从而彻底消除极化效应的影响^[3-4].目前普遍采用的用于制备非极性 GaN 基材料的技术途径有两种:(1)在 LiAlO_2 的衬底上利用 MBE 技术生长 $(\bar{1}\bar{1}00)m$ 面 GaN;(2)在 r 面 $(\bar{1}\bar{1}02)$ 蓝宝石衬底用 MBE, MOCVD 和 HVPE 技术生长 a 面 $(11\bar{2}0)$ GaN 材料. r 面蓝宝石因其在高温下稳定,且在其上生长的 GaN 材料背底掺杂浓度低,是一种更有前途的衬底材料,因此在 r 面蓝宝石上生长 a 面 GaN 成为这一领域的研究热点^[5-6].

1 试 验

笔者研究的 GaN 异质结材料是采用 MOCVD 技术,分别在 c 面蓝宝石和 r 面蓝宝石衬底上生长的,并以 TEGa, TMAI 和 NH_3 为 Ga 源、Al 源和 N 源,高纯 H_2 为载气,生长压力为 $40 \times 1.333 22 \times 10^2$ Pa. 首先在衬底上生长一层约 30 nm 厚的 AlN 成核层,紧接着生长一层约 1 250 nm 厚的未掺杂 GaN 缓冲层,由于 c 面氮化镓是在 c 面生长,而 a 面氮化镓是在 r 面生长, r 面和 c 面成 57.6° 角. a 面氮化镓的生长方向以及 c 面氮化镓的生长方向如图 1 所示.图 1(a)为蓝宝石衬底及上面生长的氮化镓示意图, x 轴平行于蓝宝石 $(\bar{1}\bar{1}02)$ 面的法线方向, y 轴和 z 轴分别平行于蓝宝石的 $(\bar{1}\bar{1}20)$ 面和 $(\bar{1}\bar{1}0\bar{1})$ 面^[7-8].图 1(b)为 a 面的原子排列图, a 面内的原子排列和 c 面截然不同, c 面的每一个面内都是同一种类的原子(Ga 或者 N),而 a 面并非都是同一种类的原子,而是 Ga 和 N 原子交替排列.这也是 c 面和 a 面 GaN 材料特性有较大差异的根本原因.

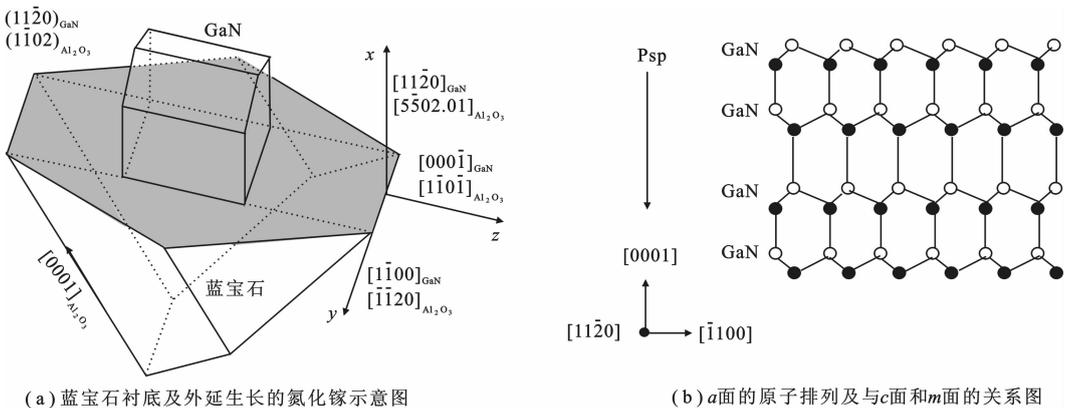
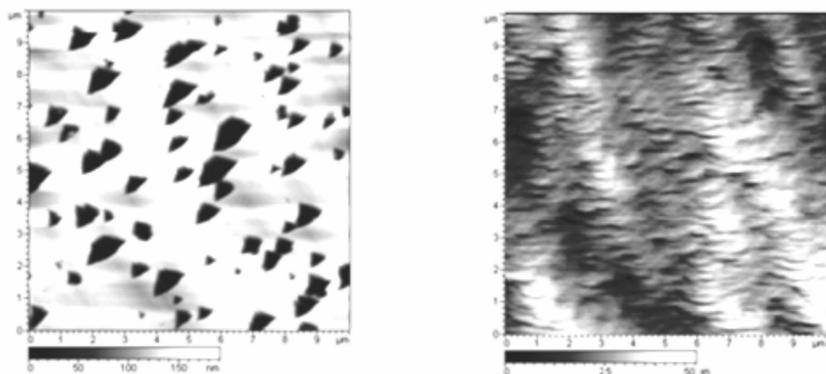


图 1 蓝宝石衬底外延晶向及氮化镓原子排列图

笔者用原子力显微镜和高分辨 XRD、光致发光谱比较了生长在 r 面蓝宝石上的 a 面 GaN 和 c 面蓝宝石上的 c 面 GaN 的结晶质量、表面形貌、缺陷结构,分析了缺陷差异的原因,发现了极性面的蓝移现象.

2 实验结果分析和讨论

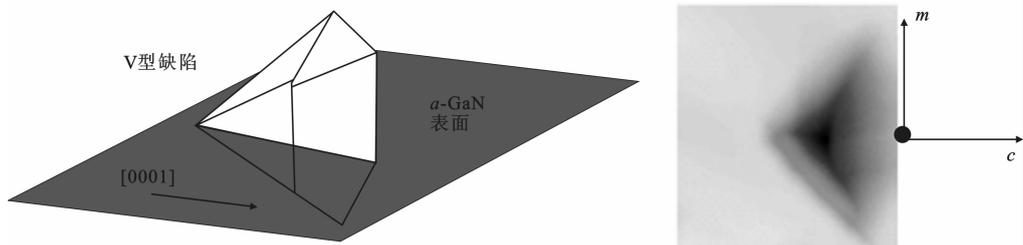
a 面和 c 面 GaN 的 AFM $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 表面形貌图如图 2 所示, c 面 GaN 表面较平整,出现了原子台阶,有很少的缺陷,而 a 面 GaN 出现了三角坑的表面形貌,三角坑大小并不一致,但是三角坑的所有斜边、直角边均有相同的方向.这种三角坑可以用在 c 面 GaN 上经常出现的 V 型缺陷来解释.在 c 面 GaN 生长过程中由于晶格失配和热失配,经常产生 V 型缺陷^[9-10],如图 3(a)所示.这种缺陷沿着 c 轴呈现一个三角锥形状,由于 a 面和 c 面的垂直关系,在 a 面上呈现了三角形状,直角三角坑的斜边是沿着 m 轴的,而斜边的中垂线是沿着 c 轴的反方向,坑底的两个对称斜面是两个倾斜的 $[10\bar{1}1]$ 面.均方根粗糙度是反映材料表面形貌的一个重要参数. AFM $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ a 面 GaN 的均方根粗糙度为 12 nm,而 AFM $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ c 面 GaN 的均方



(a) a 面GaN的AFM $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 表面形貌图 (b) c 面GaN的AFM $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 表面形貌图

图 2 极性面和非极性面 AFM 表面形貌比较

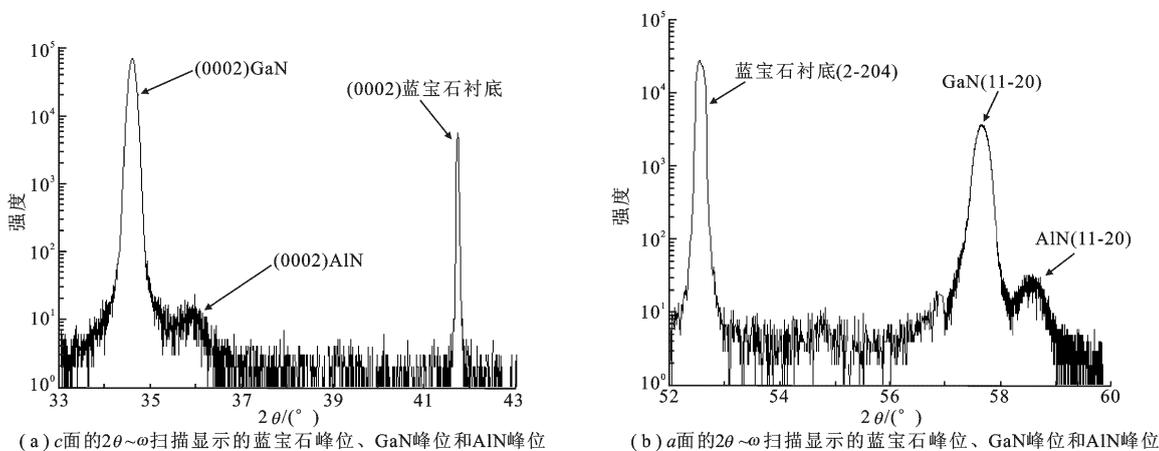
根粗糙度为 1.3 nm, 两种材料的表面平整度相差较大, 这也是 a 面 GaN 材料的一个国际性问题, 很多人采用 ELOG 的方法进行生长^[11-13].



(a) c 面GaN的V型缺陷

(b) a 面GaN的AFM $1\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$ 表面形貌图

图 3 非极性 GaN 缺陷产生原理及 $1\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$ AFM 形貌图



(a) c 面的 $2\theta\sim\omega$ 扫描显示的蓝宝石峰位、GaN 峰位和 AlN 峰位

(b) a 面的 $2\theta\sim\omega$ 扫描显示的蓝宝石峰位、GaN 峰位和 AlN 峰位

图 4 极性面和非极性面的 $2\theta\sim\omega$ 扫描比较图

高分辨 X 射线衍射 (HRXRD) 技术是一种无损伤的研究材料结构的方法, 也是目前材料表征的一种重要方法. 为了更进一步地分析两种材料的结晶质量, 笔者采用高分辨 X 射线衍射仪进行了 $2\theta\sim\omega$ 扫描, 确定了极性面和非极性面的材料及衬底峰位及半高宽, 见图 4. 极性 c 面 GaN 的峰位在 34.6° , c 面 AlN 的峰位在 35.8° , 蓝宝石衬底的峰位在 41.6° . 对于非极性材料, 蓝宝石峰位在 52.7° , GaN 的峰位在 57.6° , a 面 AlN 的峰位在 58.6° . 非极性 GaN 的半高宽为 0.23° , 而极性 GaN 的半高宽为 0.10° . 半高宽越小, 材料质量越好, 它能反映两个问题: 第一, 外延膜结晶的完整性; 第二, 外延膜的厚度均匀性. 也就是说由于材料质量的不同导致的布拉格衍射峰的宽度不同, 位错越多则布拉格峰越宽. 极性材料的半高宽比非极性材料的一半还小, 这说明非极性材料的质量确实和极性材料有很大差距, 目前非极性材料的生长也是一个国际性难题^[14].

为了比较研究 a 面和 c 面的光学性质,使用 325 nm 的氩镉激光器进行了常温 PL 谱测量,结果如图 5 所示.从光致发光谱可以看出, c 面氮化镓的光致发光强度要比 a 面氮化镓的强,但是光致发光谱都是由黄带(YB)、蓝带(BB)和紫外带(UVB)组成.黄带和蓝带主要是由于施主和受主的复合引起的,而紫外带是由于带带复合引起的^[15-17]. c 面的发光强度比 a 面的强,这是由于 c 面材料的质量较好,而 a 面材料的结晶质量是一个国际性问题,目前是国际上研究的热点.

3 总 结

笔者采用低温 AlN 作为缓冲层,在 $(1\bar{1}02)$ r 面蓝宝石和 $(0001)c$ 面蓝宝石上分别生长了 $(11\bar{2}0)a$ 面和 $(0001)c$ 面 GaN.用原子力显微镜和高分辨 XRD、光致发光谱比较了生长在 r 面蓝宝石上的 a 面 GaN 和 c 面蓝宝石上的 c 面 GaN,发现 a 面 GaN 材料质量和 c 面 GaN 相差较大, a 面 GaN 出现了三角坑的表面形貌,这和传统的 c 面生长的极性 GaN 截然不同.对 a 面 GaN 的缺陷形成原因进行了讨论,并且确定了三角坑缺陷的晶向.对于 ELOG 非极性面的 GaN,将在后续工作中研究.

参考文献:

- [1] 张进城,郝跃,王冲,等.基于蓝宝石衬底的高性能 AlGaIn/GaN 二维电子气材料与 HEMT 器件[J].半导体学报,2004,25(10):1281-1284.
Zhang Jincheng, Hao Yue, Wang Chong, et al. Super AlGaIn/GaN Two-dimensional Electron Gas Materials and HEMT Devices on Sapphire Substrates[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(10): 1281-1284.
- [2] Shen L, Keller S, Chakraborty A, et al. Nitride-based High Electron Mobility Transistors with a GaN Spacer[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(17): 073508-1-073508-3.
- [3] 张金凤,郝跃. AlGaIn/GaN 中二维电子气研究新进展[J].西安电子科技大学学报,2003,30(3):326-330.
Zhang Jinfeng, Hao Yue. AlGaIn/GaN Two-dimensional Gas; a Critical Review[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(3): 326-330.
- [4] Ju W T, Daniel A, Gu L, et al. Epitaxial Lateral Overgrowth of Gallium Nitride on Silicon Substrate[J]. Journal of Crystal Growth, 2004, 263(4): 30-34.
- [5] 颜建锋,张洁,郭丽伟,等. r 面蓝宝石衬底上采用两步 AlN 缓冲层法外延生长 a 面 GaN 薄膜及应力研究[J].半导体学报,2007,28(10):1562-1567.
Yan Jianfeng, Zhang Jie, Guo Lili, et al. Growth and Stress Analysis of a -plane GaN Films Grown on r -plane Sapphire Substrate with Two-step AlN Buffer Layer[J]. Journal of Semiconductors, 2007, 28(10): 1562-1567.
- [6] Theeradetch D. Green Light Emitting Diodes on a -plane GaN Bulk Substrates[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(24): 241109-1-241109-3.
- [7] Roder C, Einfeldt S, Figge S. Stress and Wafer Bending of a -plane GaN Layers on r -plane Sapphire Substrates [J]. Journal of Applied Physics, 2006,100(10): 103511-1-103511-2.
- [8] Wu Feng, Craven M D, Lim S H, et al. Speck Polarity Determination of a -plane GaN on r -plane Sapphire and Its Effects on Lateral Overgrowth and Heteroepitaxy[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(2): 942-947.
- [9] Ni X, Fu Y, Morkoc H B. Optimization of $[11\bar{2}0]$ a -plane GaN Growth by MOCVD on $[1\bar{1}02]$ r -plane Sapphire[J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 290(1): 166-170.
- [10] Ko T S, Wang T C, Gao R C. Study on Optimal Growth Conditions of a -plane GaN Grown on r -plane Sapphire by Metal-organic Chemical Vapor Deposition[J]. Journal of Crystal Growth, 2007, 300(2): 308-313.
- [11] Craven M D, Lim S H, Wu F. Threading Dislocation Reduction Via Laterally Overgrown Nonpolar $(11\bar{2}0)$ a -plane GaN [J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(7): 1201-1203.

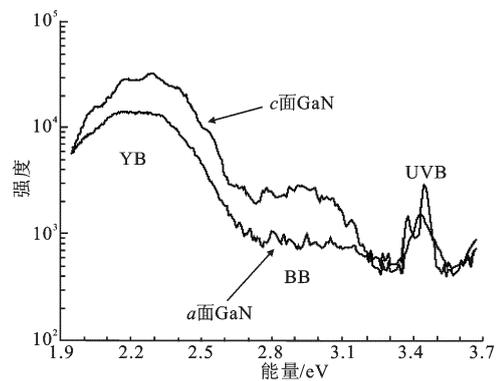


图 5 a 面和 c 面氮化镓常温 PL 谱