

等离子体增强原子层沉积 AlN 外延单晶 GaN 研究

卢 灏^{1,2}, 许晟瑞¹, 黄 永², 陈 兴², 徐 爽¹, 刘 旭¹,
王心颢¹, 高 源¹, 张雅超¹, 段小玲¹, 张进成¹, 郝 跃¹

(1. 西安电子科技大学 微电子学院, 西安 710071; 2. 西安电子科技大学芜湖研究院 先进微电子器件研究中心, 芜湖 241000)

摘 要: 氮化镓(GaN)作为第三代半导体材料, 具有较大的禁带宽度, 较高的击穿电场强度、电子迁移率、热导系数以及直接带隙等优异特性, 被广泛应用于电子器件和光电子器件中。由于与衬底的失配问题, 早期工艺制备 GaN 材料难以获得高质量单晶 GaN 薄膜。直到采用两步生长法, 即先在衬底上低温生长氮化铝(AlN)成核层, 再高温生长 GaN, 才极大地提高了 GaN 材料的质量。目前用于制备 AlN 成核层的方法有磁控溅射以及分子束外延等, 为了进一步提高 GaN 晶体质量, 本研究提出在两英寸 *c* 面蓝宝石衬底上使用等离子体增强原子层沉积(Plasma-enhanced Atomic Layer Deposition, PEALD)方法制备 AlN 成核层来外延 GaN。相比于磁控溅射方法, PEALD 方法制备 AlN 的晶体质量更好; 相比于分子束外延方法, PEALD 方法的工艺简单、成本低且产量大。沉积 AlN 的表征结果表明, AlN 沉积速率为 0.1 nm/cycle, 并且 AlN 薄膜具有随其厚度变化而变化的岛状形貌。外延 GaN 表征结果表明, 当沉积厚度为 20.8 nm 的 AlN 时, GaN 外延层的表面最平整, 均方根粗糙度为 0.272 nm, 同时具有最好的光学特性以及最低的位错密度。本研究提出了在 PEALD 制备的 AlN 上外延单晶 GaN 的新方法, 沉积 20.8 nm 的 AlN 有利于外延高质量的 GaN 薄膜, 可以用于制备高电子迁移率晶体管及发光二极管。

关 键 词: GaN; AlN; 等离子体增强原子层沉积; 成核层; 外延

中图分类号: TM23 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2024)05-0547-07

Epitaxy Single Crystal GaN on AlN Prepared by Plasma-enhanced Atomic Layer Deposition

LU Hao^{1,2}, XU Shengrui¹, HUANG Yong², CHEN Xing², XU Shuang¹,
LIU Xu¹, WANG Xinhao¹, GAO Yuan¹, ZHANG Yachao¹,
DUAN Xiaoling¹, ZHANG Jincheng¹, HAO Yue¹

(1. School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Advanced Microelectronic Device Research Center, XIDIAN-WUHU Research Institute, Wuhu 241000, China)

Abstract: As the third generation semiconductor material, gallium nitride (GaN) is widely used in electronic devices and optoelectronic devices due to its excellent characteristics such as wide band gap, high breakdown field strength, high electron mobility, outstanding thermal conductivity, and direct band gap. However, it is difficult to obtain high

收稿日期: 2023-10-20; 收到修改稿日期: 2023-11-29; 网络出版日期: 2024-01-08

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3604400); 国家自然科学基金(62074120, 62134006); 中央高校基本科研业务费(JB211108)

National Key Research and development Program of China (2022YFB3604400); National Natural Science Foundation of China (62074120, 62134006); Fundamental Research Funds for the Central Universities (JB211108)

作者简介: 卢 灏(1998-), 男, 硕士研究生. E-mail: 2319175454@qq.com

LU Hao (1998-), male, Master candidate. E-mail: 2319175454@qq.com

通信作者: 许晟瑞, 教授. E-mail: srxu@xidian.edu.cn

XU Shengrui, professor. E-mail: srxu@xidian.edu.cn

quality single crystal GaN thin films due to the mismatch between GaN material and substrate in early phase of preparation. Until the two-step growth method is proposed, in which the nucleation layer of aluminum nitride (AlN) is firstly grown on the substrate at low temperature, and then GaN is grown at high temperature, the quality of GaN is greatly improved. Nowadays, AlN nucleation layers are fabricated *via* magnetron sputtering and molecular beam epitaxy, *etc.* To further improve the quality of GaN crystals, this study used plasma-enhanced atomic layer deposition (PEALD) method to prepare AlN nucleation layers for the epitaxial growth of GaN on a two-inch *c*-plane sapphire substrate. Compared with the magnetron sputtering method and molecular beam epitaxy method, the crystal quality of AlN prepared by PEALD method displays advantages of simple process, low cost and high yield. Measurements on deposited AlN films show that the deposition rate is 0.1 nm/cycle and the films have island-like structures varying with its thickness. Epitaxial GaN measurements show that GaN epitaxial layer can obtain the smoothest surface with a root mean square roughness of 0.272 nm, the best optical properties, and the lowest dislocation density when AlN is deposited with a thickness of 20.8 nm. In conclusion, a new method of epitaxial single crystal GaN on AlN prepared by PEALD has been built with optimal deposition at 20.8 nm of AlN to obtain high quality GaN thin films, it can be used to prepare high electron mobility transistors and light-emitting diodes.

Key words: GaN; AlN; plasma-enhanced atomic layer deposition; nucleation layer; epitaxy

半导体氮化镓(GaN)材料具有直接带隙、禁带宽、热导系数高、击穿电场强度高以及电子迁移率高等优异特性^[1],被广泛应用于电子器件和光电子器件中,如高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)^[2]、发光二极管(Light Emitting Diode, LED)^[3-5]、激光二极管(Laser Diode, LD)^[6]和紫外探测器(Ultraviolet Photodetector, UV PD)^[7]等。目前通过多种外延方式均可获得 GaN 单晶材料,其中金属有机化学气相沉积(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)具有外延质量好、反应速率快、重复性高和产量大等优点^[8],是制备 GaN 最常用的方法。

使用 MOCVD 制备 GaN 时,常用异质外延的方式,其中蓝宝石衬底以成本低、尺寸小和工艺成熟等特点,成为外延 GaN 的主要衬底之一。而 GaN 与蓝宝石衬底之间存在较大的晶格失配和热失配,由此产生的大量位错会使器件性能退化。因此,制备高质量 GaN 时,常需要氮化铝(AlN)材料作为成核层。AlN 成核层为外延 GaN 提供了与衬底取向相同的成核中心,同时释放了 GaN 与衬底间的晶格失配应力和热膨胀失配应力^[9],有利于后续 GaN 材料的二维(2D)生长。AlN 成核层的常用制备方法有 MOCVD 的两步生长法和磁控溅射法^[10],也可使用分子束外延法^[11]。等离子体增强原子层沉积(Plasma-enhanced Atomic Layer Deposition, PEALD)技术也可用于制备 AlN 薄膜材料^[12-14],其特点是能在真空和低温环境下实现单原子层沉积^[15],从而获得低杂质浓度、高质量的 AlN 薄膜。这种方法制备

的 AlN 材料已经用于多种半导体器件中^[16-18],但是目前少有将 PEALD 制备的 AlN 作为成核层外延生长单晶 GaN 的报道。本研究提出在蓝宝石上使用 PEALD 制备 AlN 来外延生长单晶 GaN,探究不同厚度的 AlN 作为成核层对 GaN 外延层质量的影响,寻找 AlN 作为成核层的最佳厚度。

1 实验方法

1.1 PEALD 制备 AlN

PEALD 制备 AlN 的原理是将气相前驱体三甲基铝(TMA)和氮气等离子体(N₂-plasma)脉冲交替地通入反应器,反应物在蓝宝石衬底上发生化学吸附并反应形成沉积膜。在前驱体脉冲之间使用惰性气体氩气(Ar)吹扫 PEALD 反应器^[19],其中氮气等离子体由氮氢混合气体经过射频电源提供。采用氮气等离子体作为反应 N 源与采用 NH₃ 作为 N 源相比,前者的 N、H 自由基的活性更高,可以在低于 300 °C 下制备 AlN^[20-21]。采用 PEALD 制备 AlN 薄膜时通常选择硅(Si)或蓝宝石等衬底材料^[22-23],本实验选择蓝宝石衬底。

本实验使用 ALD-150PE 设备在 *c* 面蓝宝石衬底上沉积 AlN,设置反应温度为 200 °C,开启射频电源,沉积工艺如图 1 所示,具体步骤如下:通入 0.03 s 的 TMA→通入 30 s 的 Ar 进行吹扫→通入 10 s 的流量为 20 sccm 的 N₂-plasma→通入 20 s 的 Ar 进行吹扫。

设置沉积循环周期数,便可获得不同厚度的 AlN。在两寸蓝宝石衬底上循环沉积 125、208、292

和 333 周 AlN, 分别记为样品 1、样品 2、样品 3 和样品 4。其中样品 1、样品 2 和样品 3 用于外延 GaN, 样品 4 用来测试 AlN 的沉积速率。

1.2 MOCVD 外延 GaN

MOCVD 是一种化学气相沉积技术, 由 1968 年 Manasevit^[24]提出的制备化合物半导体单晶薄膜材料的方法发展而来。对于氮化物的制备, MOCVD 采用 H_2 或 N_2 作为载气, 把源气瓶中的金属有机化合物(如三甲基镓(TMGa)、三甲基铟(TMIn)和 TMA 等)传输到反应室, 并与同时到达的 NH_3 在衬底表面发生化学反应, 生成所需氮化物, 剩余气体则通入尾气处理系统。

本工作使用 VEECO K465I 型号的 MOCVD 设备, 在沉积 AlN 后的样品 1、样品 2 和样品 3 上进行 GaN 的外延生长, 具体外延工艺条件: 反应温度为 1080 $^{\circ}C$, 压力为 26660 Pa; 使用 TMGa 作为反应 Ga 源, 流量为 630 sccm; 使用 NH_3 作为反应 N 源, 流量为 822 sccm; 使用 H_2 和 N_2 作为载气, 流量分别为 1644 和 740 sccm。

利用 MOCVD 的原位检测系统, 可以在反应过程中检测薄膜生长速率等参数, 最终制得 6 μm 厚的 GaN, 样品 1、样品 2 和样品 3 外延得到的 GaN 分别记为样品 a、样品 b 和样品 c。

2 沉积 AlN 层表征与讨论

2.1 PEALD 制备 AlN 速率验证

样品 4 的 PEALD 的 AlN 工艺循环次数最多, 获得的 AlN 薄膜最厚, 因此测试其厚度能获得最准确的沉积速率。本研究利用透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM)测试样品 4 的截面, 得到沉积 AlN 层的厚度, 如图 2 所示。TEM 照片显示 AlN 层厚度均匀, 约为 33 nm, 计算得到本研究工艺下 PEALD 沉积 AlN 的速率为 0.1 nm/cycle, 这与文献^[25]报道的 PEALD 生长 AlN 速率接近。根据此沉积速率计算得到样品 1、样品 2 和样品 3 的 AlN

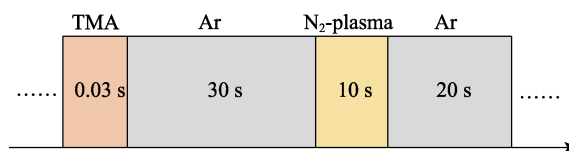


图 1 PEALD 工艺制备 AlN 的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plasma-enhanced atomic layer deposition (PEALD) process of AlN

厚度约为 12.5、20.8 和 29.2 nm。

2.2 AlN 形貌表征

使用 NX20 原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 观察沉积 AlN 后样品的表面形貌, 其 1 $\mu m \times 1 \mu m$ 尺寸的 3D 形貌如图 3 所示。沉积的 AlN 会在蓝宝石衬底上形成一种岛状的特殊形貌, 这与 PEALD 工艺制备 AlN 的报道相同^[20]。通过对比三组样品的 AFM 图, 可以观察到随着沉积厚度增大, 样品表面的小岛形貌变化明显。沉积 12.5 nm 厚 AlN 时, 小岛高度和体积较小, 大小和分布较不均匀, 表明开始形成小岛形状; 沉积 20.8 nm 厚 AlN 时, 小岛高度和体积适中, 大小和分布较为均匀, 且小岛数量最多; 沉积 29.2 nm 厚 AlN 时, 小岛高度和体积较大, 大小和分布较不均匀, 这与小岛之间的合并有关。

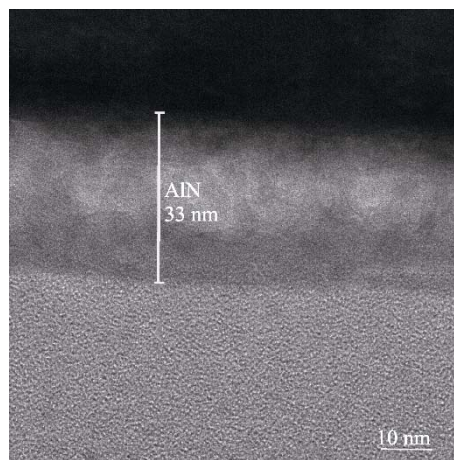


图 2 样品 4 的截面 TEM 照片

Fig. 2 Cross-sectional TEM image of sample 4

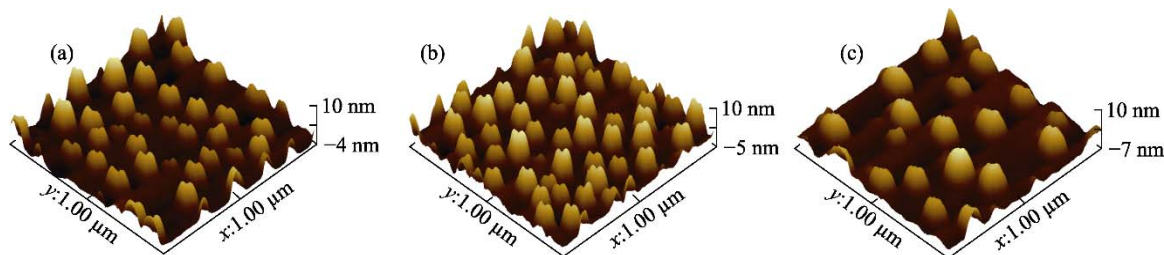


图 3 AlN 的表面形貌

Fig. 3 Surface topographies of AlN

AFM 3D images of (a) sample 1, (b) sample 2 and (c) sample 3

2.3 AlN 晶体质量表征

使用 Bruker 多晶 X 射线衍射仪 (X-ray Diffractometer, XRD) 标注沉积的多晶 AlN 薄膜, 测试结果如图 4 所示。样品 2 和样品 3 在 $2\theta=64.7^\circ$ 附近存在衍射峰, 对应 AlN 立方晶系的(220)晶面, 说明本工艺条件下, 在蓝宝石衬底上沉积 AlN 初期, 会先形成立方晶系(220)晶面的多晶, 已有报道证明沉积 AlN 会形成此类晶面^[18]。

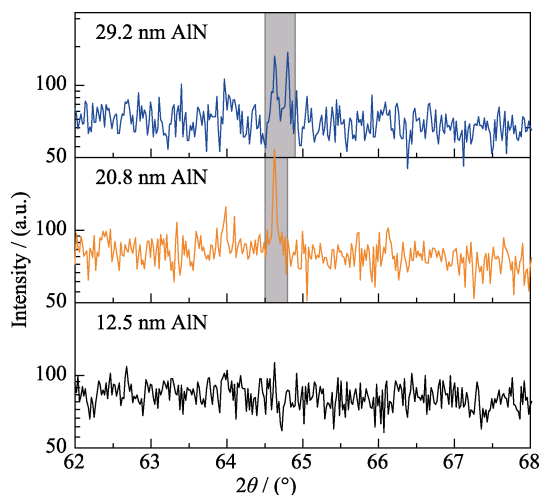


图 4 AlN 薄膜的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of AlN films

3 外延 GaN 表征与讨论

3.1 GaN 形貌表征

对完成了外延生长 GaN 的三组样品进行形貌测试, 使用 Sigma-300 扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 观察三组样品的表面形貌。在 2k 倍镜下观察三组样品表面形貌, 如图 5 所示。样品 b 表面平滑, 而样品 a 和样品 c 表面没有合并, 呈现台阶和颗粒状。样品 a 具有更大的晶粒, 样品 c 表面布满较小的颗粒, 说明样品 a 和样品 c 都有多晶化的趋势。

为进一步研究样品 b 的微观形貌, 对其进行 AFM 测试, 结果如图 6 所示。图中能明显看见 GaN 生长的台阶流, 且均方根粗糙度 (Root Mean Square Roughness, R_{ms}) 为 0.272 nm, 表明样品 b 的表面非常平坦。有报道 MOCVD 两步生长法制备 GaN 的 R_{ms} 为 0.3 nm^[26], 磁控溅射 AlN 上外延 GaN 的 R_{ms} 为 0.252 nm^[27]。AFM 测试结果表明在 PEALD 制备的 AlN 成核层上外延 GaN 材料的 R_{ms} 和用其他方法制备的 AlN 成核层上外延 GaN 的 R_{ms} 在同一水平, 表明该方法在氮化物半导体的外延领域有着巨大应用潜力。

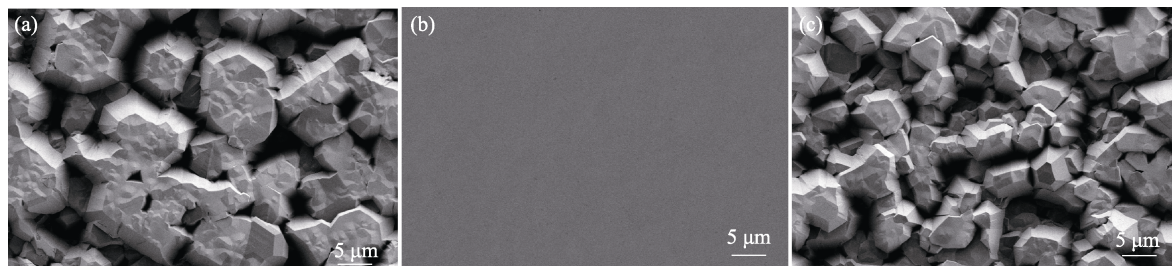


图 5 GaN 的 SEM 照片

Fig. 5 SEM images of GaN

(a) Sample a; (b) Sample b; (c) Sample c

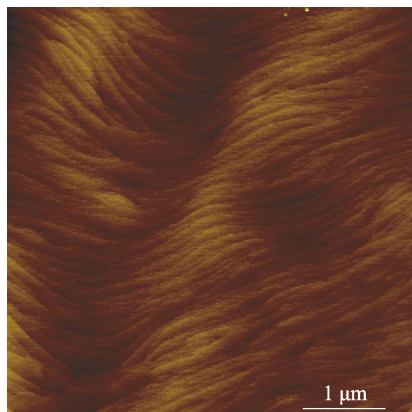


图 6 样品 b 的 AFM 图像

Fig. 6 AFM image of sample b

结合图 3 和图 6 的 AFM 图像以及图 5 的 SEM 图像结果分析, 样品 b 具有最好的表面形貌, 说明 PEALD 制备的 20.8 nm 厚度的 AlN 成核层最有利于 GaN 生长, 获得的 GaN 表面最平坦。GaN 表面形貌的差异与沉积 AlN 提供的成核机理有关^[28], 样品 a 和样品 c 表面未合并, 呈现颗粒状。根据 AlN 薄膜的表面形貌分析可知, 对于样品 c, 由于沉积的 AlN 较厚 (29.2 nm), 在蓝宝石衬底上提供了较大的成核岛且成核岛间距较大, 使 GaN 更倾向于在这些大岛上生长, GaN 的三维 (3D) 生长模式得到增强。对于样品 a, 由于沉积的 AlN 较薄 (12.5 nm), 在蓝宝石衬底上刚开始形成成核岛, 成核岛体积较小且数量不

多, 成核岛的大小和分布不太均匀, 使 GaN 生长介于 2D 生长模式和 3D 生长模式之间, 因此其表面没有连接起来形成统一的平面。对于样品 b, 由于沉积 AlN 的厚度合适(20.8 nm), 在蓝宝石衬底上形成大小适中、数量最多, 且大小和分布十分均匀的成核岛, 给外延的 GaN 提供了非常合适的成核点, 因而获得的 GaN 表面最平坦。

3.2 GaN 光学表征

为了研究外延 GaN 的应力状态, 使用 Alpha300RS 设备对三组样品进行了拉曼(Raman)测试, 结果如图 7 所示。无应变 GaN 的 $E_2(\text{high})$ 峰的频率为 567.6 cm^{-1} , 当 GaN 受到压应力时该散射峰的波数变大^[29]。图 7 可知样品 a、样品 b 和样品 c 的 $E_2(\text{high})$ 峰频率分别为 568.7 、 569.9 和 570.4 cm^{-1} ; 半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)分别为 4.78 、 3.64 和 5.57 cm^{-1} 。三组样品的 $E_2(\text{high})$ 峰频率都大于 567.6 cm^{-1} , 说明所有样品均处于压应力状态, 这是蓝宝石与 GaN 的热膨胀系数不同所导致的。蓝宝石的热膨胀系数较大, 会对外延的 GaN 产生压应力^[30]。对比样品 a、样品 b 和样品 c, 发现沉积 AlN 越薄, 外延 GaN 所受到压应力越小。因此调节沉积 AlN 层的厚度可以改变外延 GaN 的应力大小。样品 b 的 $E_2(\text{high})$ 峰的 FWHM 最小, 表明样品 b 的结晶质量最好。沿着 GaN 的 $[0001]$ 晶面入射 Raman 光时, 测试光谱中除了有明显的 $E_2(\text{high})$ 峰, 还会在 735 cm^{-1} 附近出现 $A_1(\text{LO})$ 散射峰。对比三组样品, 从样品 b 的 Raman 图谱中还能观察到明显的 $A_1(\text{LO})$ 散射峰, 频率为 736.2 cm^{-1} , FWHM 为 7.74 cm^{-1} , 这也证明样品 b 具有最好的结晶质量^[30-31]。

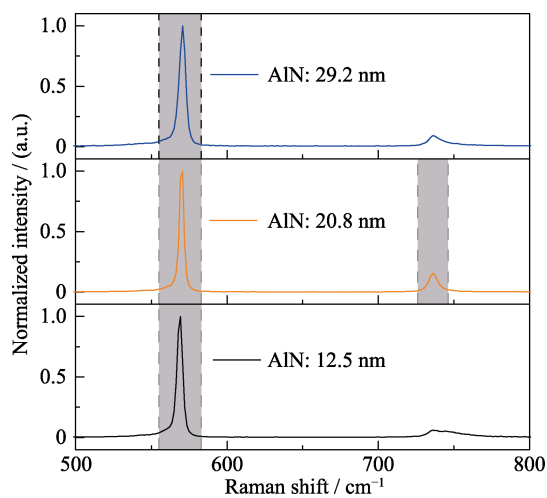


图 7 在不同厚度 AlN 成核层外延 GaN 的 Raman 光谱
Fig. 7 Raman spectra of epitaxial GaN on AlN nucleation layers with different thicknesses

为了研究 GaN 样品的光学特性, 使用 EtaMax 光致发光(Photoluminescence, PL)设备对三组 GaN 进行测试。在激光波长为 266 nm, 功率为 8 mW 的条件下, 三组样品测试结果如图 8 所示。样品 a、样品 b 和样品 c 的 FWHM 分别为 14.39、10.94 和 14.21 nm。样品 2 的 FWHM 最小, 表明其具有最好的光学特性, 这与 Raman 测试结果相符合。

3.3 GaN 晶体质量表征

为了研究不同 AlN 厚度对外延 GaN 结晶质量的影响, 使用 χ Pert³ MRD 高分辨 X 射线衍射(High Resolution X-ray Diffraction, HRXRD)仪对样品进行测试, 获得 GaN 材料的摇摆曲线。在纤锌矿结构中, 螺位错密度(Screw Dislocation Density, D_{screw})与 (002) 晶面上摇摆曲线 FWHM 的平方成正比, 刃位错密度(Edge Dislocation Density, D_{edge})与 (102) 晶面上摇摆曲线 FWHM 的平方成正比, 总位错密度(Total Dislocation Density, D_{total})为二者之和, 具体表达式如式(1)所示^[32]。

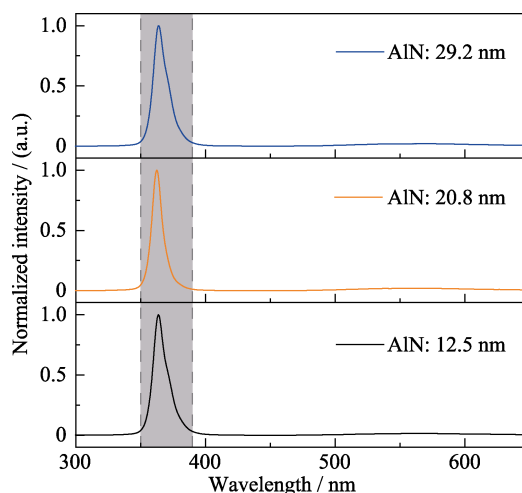


图 8 不同厚度 AlN 成核层的 GaN 的 PL 光谱图
Fig. 8 PL spectra of GaN with different thicknesses of AlN nucleation layers

$$D_{\text{total}} = D_{\text{screw}} + D_{\text{edge}} = \frac{\text{FWHM}_{(002)}^2}{4.35b_{(002)}^2} + \frac{\text{FWHM}_{(102)}^2}{4.35b_{(102)}^2} \quad (1)$$

式(1)中 $b_{(002)}$ 和 $b_{(102)}$ 分别是 (002) 晶面和 (102) 晶面的伯格矢量(Burgers Vector), 取值分别为 5.185×10^{-8} 和 $3.189 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 。对样品 b 进行测试, 结果如图 9 所示。样品 b 的 (002) 晶面摇摆曲线 FWHM 为 681 arcsec, 计算得 D_{screw} 为 $9.30 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$; (102) 晶面摇摆曲线 FWHM 为 1265 arcsec, 计算得 D_{edge} 为 $8.48 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 所以 D_{total} 为 $9.41 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 。

对样品 a 和样品 c 进行测试, 结果如图 10 所示。由于样品 a 和样品 c 表面呈现颗粒状, 所以二者(002)晶面摇摆曲线的 FWHM 特别大, 分别为 12197 和 21034 arcsec, 根据式(1)计算得到 D_{screw} 分别为 2.98×10^{11} 和 $8.87 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 比样品 b 的 D_{screw} 高了

3 个数量级, 说明样品 b 的晶体质量远优于样品 a 和样品 c。此外, 样品 a 和样品 c 的(102)晶面摇摆曲线无法测出, 也说明样品 a 和样品 c 晶体质量不佳。总之, 三组样品的 HRXRD 的测试结果表明样品 b 的 GaN 晶体质量最好。

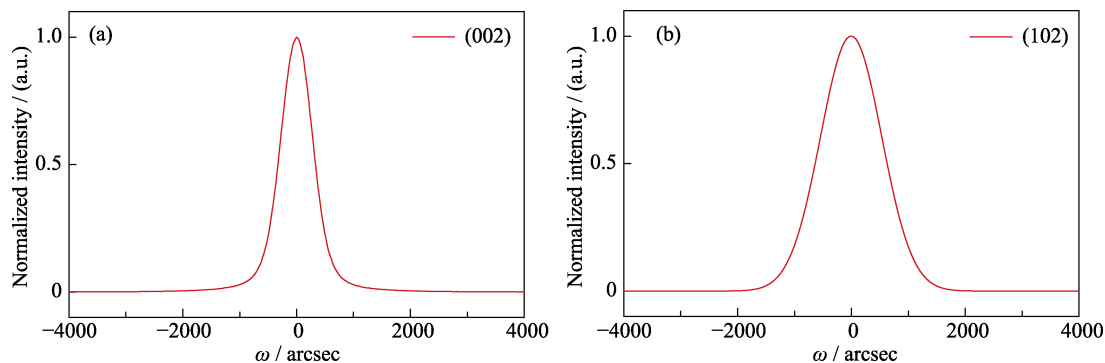


图 9 样品 b 不同晶面的摇摆曲线

Fig. 9 Rocking curves of sample b on different crystal planes
(a) (002); (b) (102)

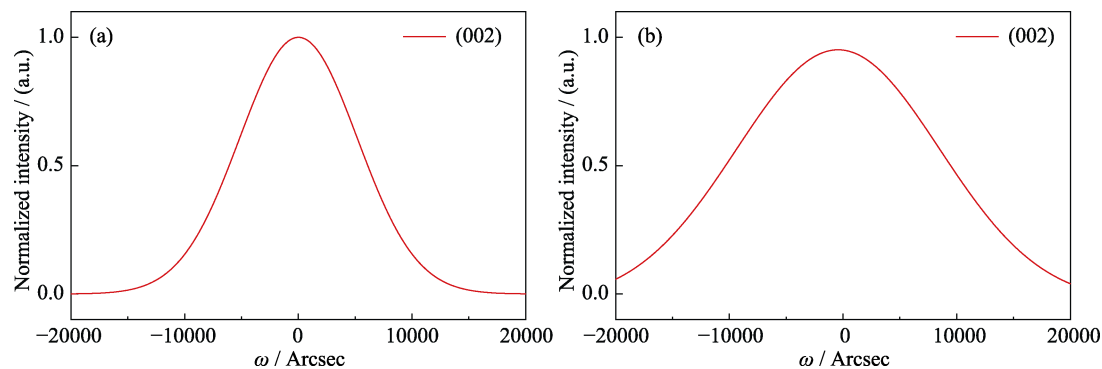


图 10 样品 a(a)和样品 c(b)(002)晶面的摇摆曲线

Fig. 10 Rocking curves of (002) crystal plane for sample a (a) and sample c (b)

4 结论

本研究在蓝宝石衬底上使用 PEALD 设备沉积的 AlN 作为成核层外延了单晶 GaN, 实验中制备了三组不同 AlN 厚度的样品作为对照, 探究了厚度对外延 GaN 的影响。在对 AlN 的测试中发现, 沉积 AlN 厚度的变化会导致 AlN 表面成核岛的大小和分布情况发生变化, 进一步导致后续外延 GaN 的质量发生变化。测试结果表明, 对于较薄(12.5 nm)和较厚(29.2 nm)的 AlN 成核层, AlN 成核岛的尺寸差异较大并且分布不均匀, 不利于外延单晶 GaN, 最终导致其上外延 GaN 的表面尚未合并。当 AlN 成核层厚度为 20.8 nm 时, AlN 成核岛的尺寸合适并分布均匀, 有利于外延单晶 GaN, 其上外延的 GaN 表明平坦, R_{ms} 为 0.272 nm, 并且具有更好的光学特

性, 其晶体质量更是得到极大提升, D_{screw} 相比于另外两组样品降低了 3 个数量级。总之, 本研究实现了在 PEALD 设备沉积 AlN 上单晶 GaN 的外延生长, 该技术为获取高质量氮化物了提供了一种新的方法。

参考文献:

- [1] FOUTZ B E, O'LEARY S K, SHUR M S, *et al.* Transient electron transport in wurtzite GaN, InN, and AlN. *Journal of Applied Physics*, 1999, **85**(11): 7727.
- [2] SHEN L, COFFIE R, BUTTARI D, *et al.* High-power polarization-engineered GaN/AlGaIn/GaN HEMTs without surface passivation. *IEEE Electron Device Letters*, 2004, **25**(1): 7.
- [3] AKASAKI I. Key inventions in the history of nitride-based blue LED and LD. *Journal of Crystal Growth*, 2007, **300**(1): 2.
- [4] TAO H C, XU S R, ZHANG J C, *et al.* Improved crystal quality and enhanced optical performance of GaN enabled by ion implantation induced high-quality nucleation. *Optics Express*, 2023, **31**(13): 20850.

- [5] DU J J, XU S R, PENG R S, *et al.* Enhancement of optical characteristic of InGaN/GaN multiple quantum-well structures by self-growing air voids. *Science China Technological Sciences*, 2021, **64**(7): 1583.
- [6] NAKAMURA S. InGaN multiquantum-well-structure laser diodes with GaN-AlGaIn modulation-doped strained-layer superlattices. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, **4**(3): 483.
- [7] RIGUTTI L, TCHERNYCHEVA M, DE LUNA BUGALLO A, *et al.* Ultraviolet photodetector based on GaN/AlN quantum disks in a single nanowire. *Nano Letters*, 2010, **10**(8): 2939.
- [8] WANG S S, GU B, XU Y, *et al.* Growth methods and its applications in optoelectronic devices of GaN-based semiconductor materials. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2002, **25**(1): 1.
- [9] AMANO H, SAWAKI N, AKASAKI I, *et al.* Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer. *Applied Physics Letters*, 1986, **48**(5): 353.
- [10] YEN C H, LAI W C, YANG Y Y, *et al.* GaN-based light-emitting diode with sputtered AlN nucleation layer. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(4): 294.
- [11] WANG L, WANG L, REN F, *et al.* GaN grown on AlN/sapphire templates. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(11): 8021.
- [12] ZHANG X Y, PENG D C, HAN J, *et al.* Effect of substrate temperature on properties of AlN buffer layer grown by remote plasma ALD. *Surfaces and Interfaces*, 2023, **36**: 102589.
- [13] FARES C, REN F, TADJER M J, *et al.* Band offset determination for amorphous Al₂O₃ deposited on bulk AlN and atomic-layer epitaxial AlN on sapphire. *Applied Physics Letters*, 2020, **117**(18): 182103.
- [14] BOSUND M, SAJAVAARA T, LAITINEN M, *et al.* Properties of AlN grown by plasma enhanced atomic layer deposition. *Applied Surface Science*, 2011, **257**(17): 7827.
- [15] SHIH H Y, LEE W H, KAO W C, *et al.* Low-temperature atomic layer epitaxy of AlN ultrathin films by layer-by-layer, *in-situ* atomic layer annealing. *Science Reports*, 2017, **7**: 39717.
- [16] KOEHLER A D, NEPAL N, ANDERSON T J, *et al.* Atomic layer epitaxy AlN for enhanced AlGaIn/GaN HEMT passivation. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, **34**(9): 1115.
- [17] CHEN D, WANG Z, HU F C, *et al.* Improved electro-optical and photoelectric performance of GaN-based micro-LEDs with an atomic layer deposited AlN passivation layer. *Optics Express*, 2021, **29**(22): 36559.
- [18] LIU C, LIU S, HUANG S, *et al.* Plasma-enhanced atomic layer deposition of AlN epitaxial thin film for AlN/GaN heterostructure TFTs. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, **34**(9): 1106.
- [19] NEPAL N, QADRI S B, HITE J K, *et al.* Epitaxial growth of AlN films via plasma-assisted atomic layer epitaxy. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(8): 082110.
- [20] FENG J H, TANG L D, LIU B W, *et al.* Low-temperature growth of AlN thin films by plasma-enhanced atomic layer deposition. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(11): 117302.
- [21] ELMERS K E, RITALA M, LESKELÄ M, *et al.* Atomic layer epitaxy growth of AlN thin films. *Le Journal de Physique IV*, 1995, **5**(2): 1021.
- [22] VAN BUI H, WIGGERS F B, GUPTA A, *et al.* Initial growth, refractive index, and crystallinity of thermal and plasma-enhanced atomic layer deposition AlN films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2015, **33**(1): 01A111.
- [23] HAGEDORN S, KNAUER A, WEYERS M, *et al.* AlN and AlN/Al₂O₃ seed layers from atomic layer deposition for epitaxial growth of AlN on sapphire. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2019, **37**(2): 020914.
- [24] MANASEVIT H M. Single-crystal gallium arsenide on insulating substrates. *Applied Physics Letters*, 1968, **12**(4): 156.
- [25] SADEGHPOUR S, CEYSSENS F, PUERS R. Crystalline growth of AlN thin films by atomic layer deposition. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, **757**(1): 012003.
- [26] KIM S, OH J, KANG J, *et al.* Two-step growth of high quality GaN using V/III ratio variation in the initial growth stage. *Journal of Crystal Growth*, 2004, **262**(1/4): 7.
- [27] CHEN Z B, ZHANG J C, XU S R, *et al.* Influence of stacking faults on the quality of GaN films grown on sapphire substrate using a sputtered AlN nucleation layer. *Materials Research Bulletin*, 2017, **89**: 193.
- [28] GAO Y, XU S R, PENG R S, *et al.* Comparative research of GaN growth mechanisms on patterned sapphire substrates with sputtered AlON nucleation layers. *Materials*, 2020, **13**(18): 3933.
- [29] MELNIK Y V, VASSILEVSKI K V, NIKITINA I P, *et al.* Physical properties of bulk GaN crystals grown by HVPE. *MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research*, 1997, **2**(39): 1.
- [30] KOZAWA T, KACHI T, KANO H, *et al.* Thermal stress in GaN epitaxial layers grown on sapphire substrates. *Journal of Applied Physics*, 1995, **77**(9): 4389.
- [31] HUSHUR A, MANGHNANI M H, NARAYAN J. Raman studies of GaN/sapphire thin film heterostructures. *Journal of Applied Physics*, 2009, **106**(5): 054317.
- [32] BAN K, YAMAMOTO J I, TAKEDA K, *et al.* Internal quantum efficiency of whole-composition-range AlGaIn multiquantum wells. *Applied Physics Express*, 2011, **4**(5): 052101.