

离子注入诱导成核外延高质量 AlN^{*}余森¹⁾²⁾³⁾ 许晟瑞^{1)2)3)†} 陶鸿昌¹⁾³⁾ 王海涛¹⁾²⁾³⁾ 安瑕¹⁾³⁾
杨赫¹⁾³⁾ 许钊¹⁾²⁾ 张进成¹⁾²⁾³⁾ 郝跃¹⁾²⁾³⁾

1) (西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体器件与集成技术全国重点实验室, 宽禁带半导体国家工程研究中心, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学广州研究院, 广州 510555)

3) (陕西省大功率半导体照明工程技术中心, 西安 710071)

(2024 年 5 月 11 日收到; 2024 年 8 月 31 日收到修改稿)

超宽禁带 AlN 材料具有禁带宽度大、击穿电场高、热导率高、直接带隙等优势, 被广泛应用于光电子器件和电力电子器件等领域. AlN 材料的质量影响着 AlN 基器件的性能, 为此研究人员提出了多种方法来提高异质外延 AlN 晶体的质量, 但是这些方法工艺复杂且成本高昂. 因此, 本文提出了诱导成核的新方法来获得高质量的 AlN 材料. 首先, 对纳米图案化的蓝宝石衬底注入不同剂量的 N 离子进行预处理, 随后基于该衬底用金属有机化学气相沉积法外延 AlN 基板, 并在其上生长多量子阱结构, 最后基于此多量子阱结构制备紫外发光二极管. 研究表明, 在注入 N 离子剂量为 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的衬底上外延获得的 AlN 基板, 其表面粗糙度最小且位错密度最低. 由此可见, 适当剂量的 N 离子注入促进了 AlN 异质外延过程中的横向生长与合并过程; 这可能是因为 N 离子的注入, 抑制了初期成核过程中形成的扭曲的镶嵌结构, 有效地降低了 AlN 的螺位错以及刃位错密度. 此外, 基于该基板制备的多量子阱结构, 其残余应力最小, 光致发光强度提高到无注入样品的 152%. 此外, 紫外发光二极管的光电性能大幅提高, 当注入电流为 100 mA 时, 光输出功率和电光转换效率分别提高了 63.8% 和 61.7%.

关键词: 氮化铝, 离子注入, 金属有机化学气相沉积, 发光二极管**PACS:** 61.72.uj, 61.72.Ff, 81.15.Kk, 85.60.Jb**DOI:** 10.7498/aps.73.20240674**CSTR:** 32037.14.aps.73.20240674

1 引言

III 族氮化物, 包括 AlN, GaN, InN 以及它们的合金材料, 作为宽禁带半导体材料的重要代表, 是当今光电子领域、电力电子领域以及射频电子领域备受关注的重要材料^[1-4]. 其中, AlN 材料具有禁带宽度大 (6.2 eV)、电子迁移率高 ($1100 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)、击穿电压高 (15.4 MV/cm)、压电系数高、热导率大 ($320 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)、硬度大、化学稳定性和热稳定

性好、体声波传播速度快 (11270 m/s) 等优点^[5-9]. 因此, AlN 材料在新一代电力电子器件、能量收集器件和声学器件的制备中得到广泛应用^[10-12]. 同时, 这种材料非常适用于制造紫外发光二极管、光电探测器和激光二极管的基板^[13-15]. 为了获得高性能的 AlN 基器件, 首先要生长出高质量的 AlN 材料. 目前 AlN 材料的主要获得方式为异质外延. 异质外延方法获得 AlN 具有成本低廉、工艺简单的优势. 由于蓝宝石材料具有工艺成熟、尺寸大、成本低廉等优势, 所以通常选取蓝宝石作为异质外

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3604400) 和国家自然科学基金 (批准号: 62074120, 62134006) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: srxu@xidian.edu.cn

延 AlN 的衬底. 但是氮化物材料与蓝宝石之间存在较大的晶格失配与热失配问题, 这会产生高密度的穿透位错, 这些位错一般会作为非辐射复合中心、带电散射中心、漏电流路径等等^[16–19], 从而降低器件的性能. 为了提高异质外延获得的 AlN 材料的质量, 先后出现了基于金属有机化学气相淀积 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD) 的两步生长法 (two step growth, TSG) 和多步生长法 (multiple step growth, MSG)、基于图形衬底的横向外延过生长技术 (epitaxial lateral overgrowth, ELOG)、基于磁控溅射的高温退火技术 (high temperature annealing, HTA)、基于二维材料 (石墨烯或 h-BN) 的准范德瓦耳斯外延技术 (quasi-van der waals epitaxy, QvdWE) 等多种方法^[20]. TSG 方法主要包括低温成核和高温生长两个步骤, 虽然工艺简单, 但是结晶质量不够好, 位错密度较高. 在此基础上衍生出的 MSG 技术虽然有所改进, 但是工艺复杂度高, 并且对位错密度的降低有限. 要通过 ELOG 技术获得高质量的 AlN 材料, 需要制备特殊的纳米图案化衬底. 采用基于磁控溅射的 HTA 技术想要获得位错密度较低的 AlN 材料, 则需要较厚的缓冲层, 而 QvdWE 方法需要借助二维材料作为媒介, 并且工艺步骤繁琐. 最近, 诱导成核技术在蓝宝石衬底获得了高质量的 GaN 以及 AlGaIn 材料, 其通过对蓝宝石衬底进行铝离子注入, 在衬底表面形成了大量的悬挂键, 这些悬挂键作为成核位点, 促进了初始成核层快速有序的生长形成规律排列的成核岛, 进而有效地缓解了后续的合并过程中产生的倾转和扭转, 降低了异质外延氮化物材料的位错密度^[21,22], 但是该方法还未曾用来制备 AlN 材料.

为克服上述问题, 本文提出了一种工艺简单、成本低廉的获得高质量 AlN 基板的技术, 即通过 N 离子注入纳米图案化的蓝宝石衬底进行预处理, 随后基于此衬底用 MOCVD 外延生长 AlN 基板. 与无注入的样品相比, 对纳米图案化的蓝宝石衬底注入 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 剂量的 N 离子, 其位错密度降低了 14%. 并以此制备了发光波长约为 395 nm 的 UV-LED (ultraviolet light emitting diode, UV-LED) 器件, 与无注入样品制备的 UV-LED 相比, 光致发光强度提高了 52%, 并在 100 mA 注入电流下, 光输出功率 (light output power, LOP) 从 71.1 mW 增大至 116.5 mW, 电光转换效率 (wall-

plug efficiency, WPE) 从 18.3% 提升到 29.6%, 光输出功率和电光转换效率分别提高了 63.8% 和 61.7%.

2 AlN 和 LED 的制备及表征

所使用的衬底为纳米图案化的蓝宝石衬底, 厚度约为 400 μm . 使用 Sumitomo NV-GSD/HE 型号离子注入设备以偏离表面法线 7° 的入射角在蓝宝石衬底上进行 N 离子注入, N 离子剂量分别为 1×10^{12} , 1×10^{13} 和 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 离子注入的能量均为 30 keV. 在完成离子注入预处理工艺后, 使用 AIXTRON 2800 G4 型 MOCVD 设备, 以三甲基铝 (trimethyl aluminum, TMAI) 作为反应 Al 源, NH_3 作为反应 N 源, H_2 作为载气. 采用相同的工艺方法对样品 S1 (无注入)、样品 S2 (注入 N 离子剂量为 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)、样品 S3 (注入 N 离子剂量为 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)、样品 S4 (注入 N 离子剂量为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) 进行 AlN (低温氮化铝成核层 (LT-AlN)/高温氮化铝生长层 (HT-AlN)—40 nm/700 nm) 的外延生长, 具体外延工艺条件为: LT-AlN 成核层, 设置生长温度 780 $^\circ\text{C}$, 生长时间 5 min, 生长厚度 40 nm; HT-AlN 生长层, 设置生长温度 1150 $^\circ\text{C}$, 生长时间 50 min, 生长厚度 700 nm.

对样品 S1—S4 的 AlN 基板外延后, 以 TMAI 作为反应 Al 源, 三甲基镓 (trimethyl gallium, TMGa) 和二甲基镓 (dimethyl gallium, DMGa) 作为反应 Ga 源, 三甲基铟 (trimethyl indium, TMIIn) 作为反应 In 源, NH_3 作为反应 N 源, 使用 H_2 和 N_2 作为载气, SiH_4 和 CP_2Mg 分别作为掺杂 Si 源与 Mg 源. 采用相同工艺方法对样品 S1—S4 进行 UV-LED 多量子阱结构的外延生长. 如图 1 所示, UV-LED 结构自下向上依次为: 400 μm 厚的纳米图案化的蓝宝石衬底、740 nm 厚的 AlN buffer 层、2 μm 厚的非故意掺杂 U-GaN 层、1.7 μm 厚的 N-GaN 层、60 nm 厚的阱前超晶格层、9 个周期的 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ (3 nm/13 nm) 的多量子阱有源区, 有源区之上为 40 nm 厚的 $\text{P-Al}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{N}$ 电子阻挡层、随后为 100 nm 厚的 P-GaN 层、最后为 5 nm 厚的 P 型重掺杂 $\text{P}^+\text{-GaIn}$ 层作为接触层.

AlN 基板生长完成之后, 使用 Bruker ICON 原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM)

和 Sigma-300 型扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 对 AlN 基板的表面形貌进行表征, 采用 Bruke D8 Discover 型高分辨率 X 射线衍射仪 (high resolution X-ray diffraction, HRXRD) 研究了 AlN 基板的晶体质量. LED 多量子阱结构生长之后, 使用 Horiba Jobin Yvon LavRam HR800 型光谱仪进行 PL 和 Raman 测试, 对 LED 多量子阱结构的光学特性和应力状况进行了分析. 样品制备成 UV-LED 器件之后, 采用维明 LED-617 型测试仪研究了 LED 器件的光电特性.

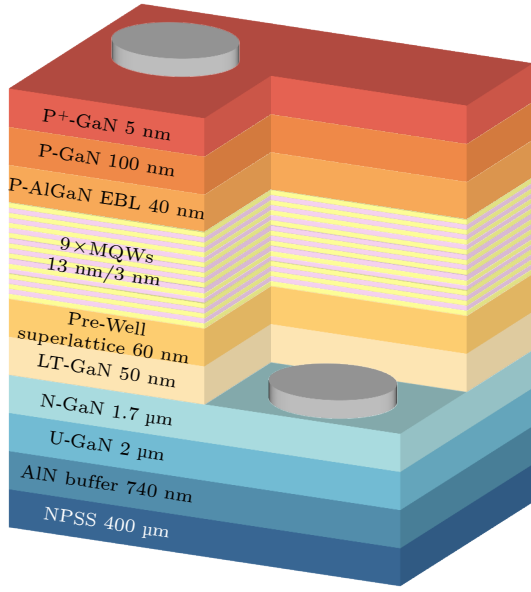


图 1 UV-LED 结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of UV-LED.

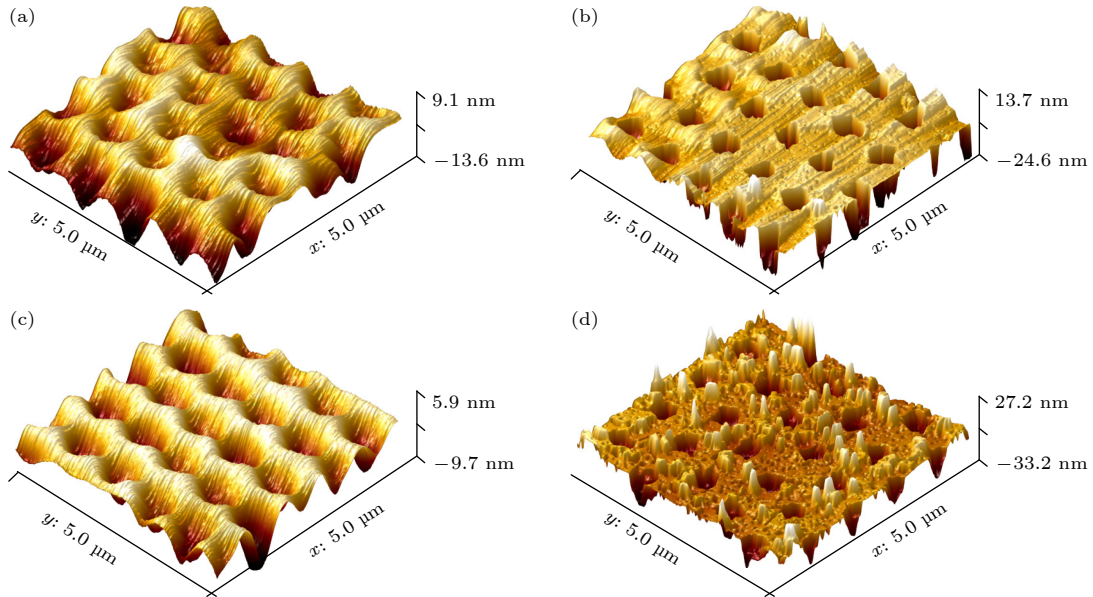


图 2 四个 AlN 基板的 AFM 测试图 (a) 样品 S1; (b) 样品 S2; (c) 样品 S3; (d) 样品 S4

Fig. 2. AFM images of four AlN buffers: (a) Sample S1; (b) sample S2; (c) sample S3; (d) sample S4.

3 结果与讨论

3.1 材料特性表征

为了观察 AlN 基板的表面形貌, 使用 AFM 的轻敲模式对四个样品进行测试, 样品 S1—S4 的 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 尺寸的 3D 形貌如图 2 所示. 样品 S1—S4 的表面均方根粗糙度 (root mean square roughness, RMS) 分别为 2.65, 4.00, 2.08, 3.16 nm. 同时, 使用 SEM 观察样品表面形貌, 样品 S1—S4 的 SEM 的扫描结果如图 3 所示. 样品 S3 的扫描结果中显示出的孔的形状最小. SEM 的扫描结果表明四个样品的二维生长速率不同 [23], 这是由于适当剂量的 N 离子注入促进了 AlN 在外延生长过程中的横向生长与合并过程.

在纤锌矿结构中, 晶体的位错情况可以根据样品在 HRXRD 测试下的 X 射线摇摆曲线 (rocking curve, RC) 的半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 反映, 具体表达式为 [24]

$$TD = D_{\text{screw}} + D_{\text{edge}} = \frac{\text{FWHM}_{(002)}^2}{4.36b_{(002)}^2} + \frac{\text{FWHM}_{(102)}^2}{4.36b_{(102)}^2}. \quad (1)$$

式中 D_{screw} 表示螺位错密度, D_{edge} 表示刃位错密度, $b_{(002)}$ 和 $b_{(102)}$ 分别是 (002) 晶面和 (102) 晶面的伯格斯矢量 (Burgers vector), AlN 晶体此处取值分别为 $4.982 \times 10^{-8}\ \text{cm}$ 和 $3.112 \times 10^{-8}\ \text{cm}$.

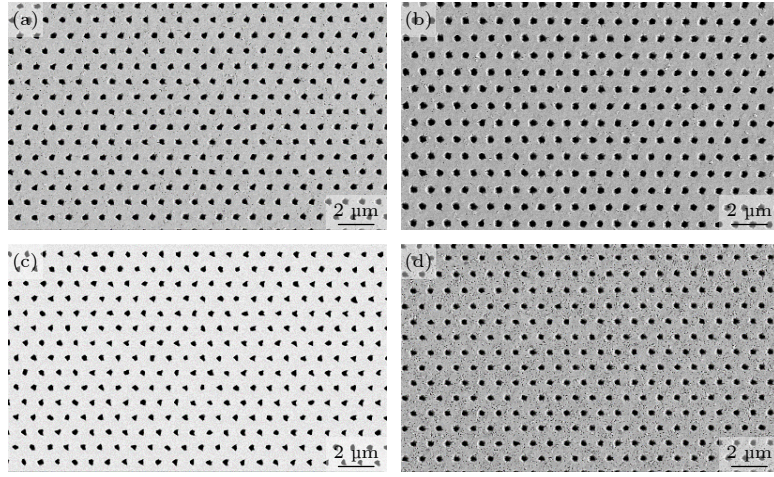


图 3 四个 AlN 基板的 SEM 测试图 (a) 样品 S1; (b) 样品 S2; (c) 样品 S3; (d) 样品 S4

Fig. 3. SEM images of four AlN buffers: (a) Sample S1; (b) sample S2; (c) sample S3; (d) sample S4.

为了探究外延所得 AlN 基板的生长质量与衬底的离子注入剂量的关系, 使用 HRXRD 对外延所得的 AlN 基板进行表征, 获得的摇摆曲线测试结果如图 4 所示: (002) 面 RC 曲线 FWHM 值依次是 827 arcsec, 1033 arcsec, 350 arcsec, 1913 arcsec; (102) 面 RC 曲线的 FWHM 值依次是 1470 arcsec, 1619 arcsec, 1427 arcsec, 2589 arcsec. 根据摇摆曲线的 FWHM 值, 可以估算出样品 S1—S4 的螺位错密度依次为 1.48×10^9 , 2.32×10^9 , 2.66×10^8 , $7.95 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$; 刃位错密度依次为 1.20×10^{10} , 1.46×10^{10} , 1.13×10^{10} 和 $3.73 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. 其中, 注入样品 S3 与无注入样品 S1 相比, 螺位错密度降低了 82%, 刃位错密度降低了 6%, 总位错密度降低了 14%. 可见对纳米图案化的蓝宝石衬底注入 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的 N 离子, 有助于降低外延的 AlN 基板的位错密度, 尤其对降低螺位错密度效果显著, 这可能是因为 N 离子的注入, 抑制了初期成核过程中形成的扭曲的镶嵌结构, 有效地降低了 AlN 基板的螺位错以及刃位错密度.

为了研究外延的多量子阱结构的应力状态, 用波长为 633 nm 的激光对样品 S1—S4 进行 Raman 测试. 无应变状态下 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右移. 如图 5 所示, 样品 S1—S4 的 GaN 的 $E_2(\text{high})$ 峰的频率和半峰全宽分别为 570.5 cm^{-1} 和 5.95 cm^{-1} , 571.4 cm^{-1} 和 6.01 cm^{-1} , 568.9 cm^{-1} 和 5.64 cm^{-1} , 569.2 cm^{-1} 和 7.53 cm^{-1} . 四个样品的 $E_2(\text{high})$ 峰的频率都大于 567.6 cm^{-1} , 说明四个样品均处于压应力状态. 对比样品 S1—S4 发现样品 S3 的 $E_2(\text{high})$

峰的半峰全宽最小, 峰位最接近 567.6 cm^{-1} , 这说明样品 S3 的结晶质量最好, 残余压应力最小. 此外沿着 GaN 的 [0001] 晶向入射 Raman 光, 测试光谱中除了有明显的 $E_2(\text{high})$ 峰, 还在 735 cm^{-1} 附近存在 $A_1(\text{LO})$ 散射峰. 对比四个样品, 样品 S3 的 Raman 谱图的 $A_1(\text{LO})$ 散射峰的右侧杂峰最小, 频率为 737.9 cm^{-1} , FWHM 为 8.2 cm^{-1} , 这也表明了样品 S3 具有相对最好的结晶质量 [25,26].

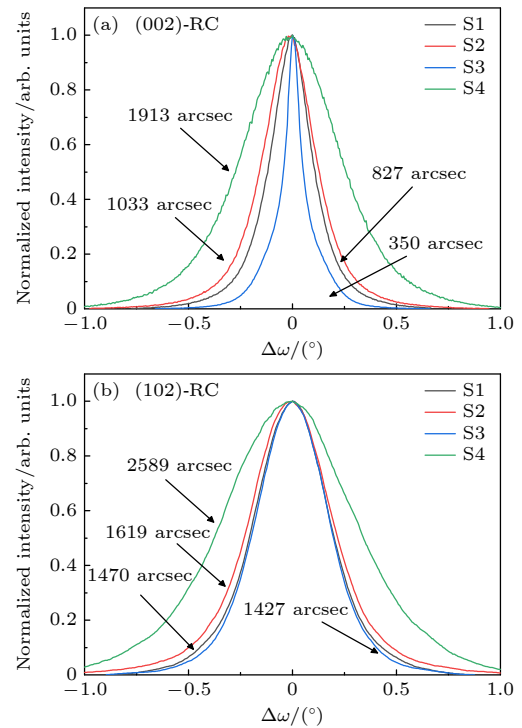


图 4 样品 S1—S4 的 XRD 摇摆曲线图 (a) (002) 面; (b) (102) 面

Fig. 4. XRD rocking curves of samples S1—S4: (a) (002)-RC; (b) (102)-RC.

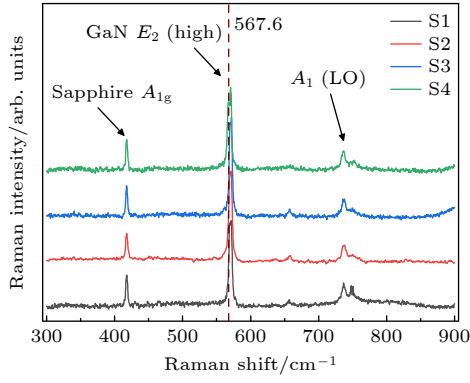


图 5 四个样品的室温下 Raman 图

Fig. 5. Raman images of four samples at room temperature.

为了表征四个样品外延所得的 LED 多量子阱结构的光学性质, 室温下 (300 K) 对四个样品 S1—S4 进行 PL 测试, 使用的激发激光的波长为 325 nm. 测试结果如图 6 所示, 四个样品的峰值波长均在 395 nm 左右, 并且样品 S1—S4 的发光波长和半峰全宽分别为 391.9 nm 和 13.2 nm, 395.5 nm 和 12.2 nm, 393.4 nm 和 11.7 nm, 391.8 nm 和 12.1 nm. PL 的测试结果表明, 样品 S3 的 FWHM 最小, 且发光强度最大, 为 S1 的 152%, 这表明其具有最好的光学特性和生长质量.

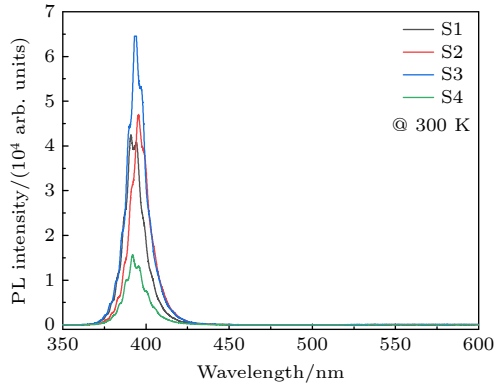


图 6 四个样品的室温下 PL 图

Fig. 6. PL images of four samples at room temperature.

3.2 LED 器件性能测试

基于以上四个 LED 结构, 将无注入样品 S1 与注入样品 S3 制备成 LED 器件, 并分别将其作为对照组 (Control LED) 和实验组 (Treatment LED), 以进一步验证 AlN 晶体质量的提高对器件性能的实际影响. 如图 7 所示, 分别表征了 LED 器件的 I - V 特性曲线、光输出功率与电光转换效率随注入电流的变化曲线. 如图 7(a) 所示, I - V 特性

曲线无明显差别, 说明晶体质量的提高对 LED 的开启电压影响较小. 如图 7(b) 所示, 在 100 mA 的注入电流下, Treatment LED 相比 Control LED, 光输出功率从 71.1 mW 提高到 116.5 mW, 光输出功率提升了 63.8%. 如图 7(c) 所示, 100 mA 的注入电流下器件的电光转换效率从 18.3% 增加到 29.6%, 提高了 61.7%. 由此不难看出, 离子注入预处理衬底技术是一种获得高质量 AlN 材料有效的

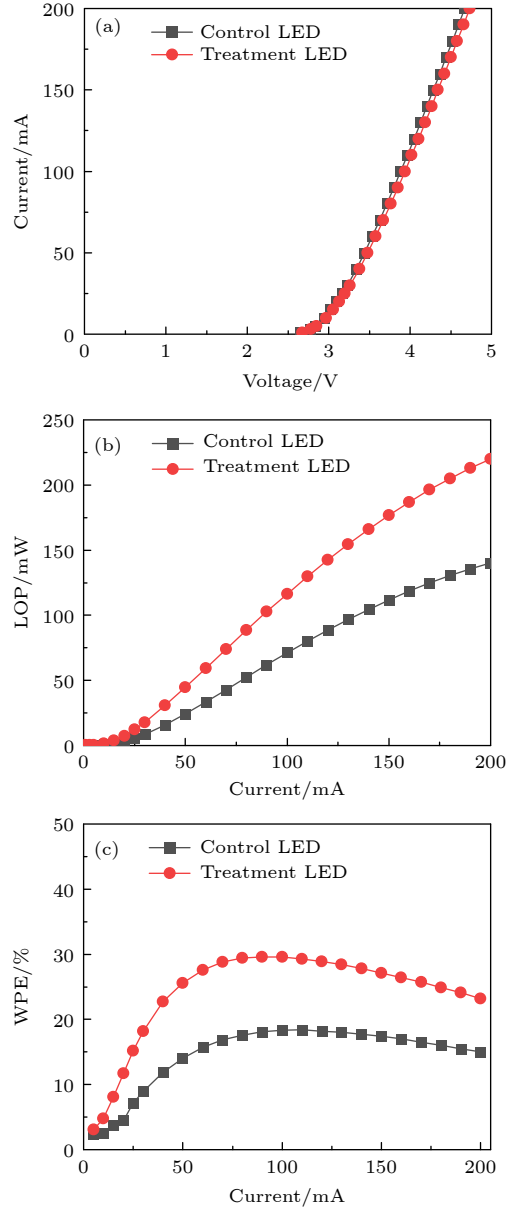


图 7 实验组 LED 和对照组 LED 的光电特性测试结果 (a) I - V 特性曲线; (b) LOP 随注入电流的变化曲线; (c) 电光转换效率随注入电流的变化曲线

Fig. 7. Photoelectric performance of control device and treatment device: (a) I - V characteristic; (b) light output power versus injection current; (c) wall-plug efficiency curve versus injection current.

方法,且基于该 AlN 基板可以有效地提升紫外 LED 器件的性能.

3.3 结果讨论

文献 [21] 和 [22] 中将诱导成核技术用于 GaN 和 AlGaIn 外延时所用的衬底是常规的平面蓝宝石衬底,通过在其上离子注入不同剂量的 Al 离子实现诱导成核作用,因为图形衬底是制备 LED 的主要衬底,本文采用了纳米图案化的蓝宝石衬底,同时注入离子为 N 离子. 综合本文与文献中的工作,可见离子注入预处理衬底可以获得高质量的异质外延氮化物材料,该方法的作用机理在于,注入离子促进了异质外延过程中初始成核层的高质量生长,形成密度可控(离子注入剂量控制)的规则有序的成核岛,从而促进了 AlN 材料在横向生长与合并过程中湮灭更多的位错,有效地降低了氮化物材料的螺位错和刃位错密度,提高了材料质量.

4 结 论

本文对纳米图案化的蓝宝石衬底注入不同剂量的 N 离子 (1×10^{12} , 1×10^{13} , 1×10^{14} cm⁻²),同时设置无注入对照样品. 随后用 MOCVD 在四个衬底上外延 AlN 基板,随后生长多量子阱结构,最终制备出波长约为 395 nm 的 UV-LED. 对 AlN 基板进行了 HRXRD 与 AFM 测试,结果表明当注入 N 离子剂量为 1×10^{13} cm⁻² 时,外延所得的 AlN 基板展现出最低的表面粗糙度, RMS 仅为 2.08 nm,并且位错密度最低,比无注入样品降低了 14%. 此外,对多量子阱结构进行了 Raman 和 PL 测试,结果表明当注入 N 离子剂量为 1×10^{13} cm⁻² 时,样品具有最小的残余压应力和最大的光致发光强度且比无注入样品高出 52%. 基于上述结果,选取了 N 离子注入剂量为 1×10^{13} cm⁻² 的样品作为实验组,以及无注入的样品作为对照组,分别制备了 UV-LED 器件. 光电性能测试结果表明,在 100 mA 的注入电流下,实验组 LED 的 LOP 从 71.1 mW 提高到了 116.5 mW,并且 WPE 从 18.3% 提高到了 29.6%. 综上所述,本文开发了一种 N 离子注入诱导成核的方法,提高了异质外延 AlN 材料的质量,并基于此技术制备出了高性能 LED 器件. 实验结果证实,提高 AlN 晶体质量可以有效地增强器件性能,表明离子注入诱导成核技术在制造高性能 AlN 基器

件方面具有巨大的潜力.

参考文献

- [1] Xu S, Xu S R, Wang X H, Lu H, Liu X, Yun B X, Zhang Y C, Zhang T, Zhang J C, Hao Y 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 196101 (in Chinese) [徐爽, 许晟瑞, 王心颖, 卢灏, 刘旭, 俞博祥, 张雅超, 张涛, 张进成, 郝跃 2023 *物理学报* **72** 196101]
- [2] Wu P, Zhang T, Zhang J C, Hao Y 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 158503 (in Chinese) [武鹏, 张涛, 张进成, 郝跃 2022 *物理学报* **71** 158503]
- [3] Guo H J, Duan B X, Yuan S, Xie S L, Yang Y T 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 167301 (in Chinese) [郭海君, 段宝兴, 袁嵩, 谢慎隆, 杨银堂 2017 *物理学报* **66** 167301]
- [4] Niass M I, Wang F, Liu Y H 2022 *Chin. J. Electron.* **31** 683
- [5] Taniyasu Y, Kasu M, Makimoto T 2006 *Nature* **441** 325
- [6] Yu R X, Liu G X, Wang G D, Chen C M, Xu M S, Zhou H, Wang T L, Yu J X, Zhao G, Zhang L 2021 *J. Mater. Chem. C* **9** 1852
- [7] Fu H Q, Baranowski I, Huang X Q, Chen H, Lu Z J, Montes J, Zhang X D, Zhao Y J 2017 *IEEE Electron Device Lett.* **38** 1286
- [8] Cheng Z, Koh Y R, Mamun A, Shi J, Bai T, Huynh K, Yates L, Liu Z, Li R, Lee E 2020 *Phys. Rev. Mater.* **4** 044602
- [9] Amano H, Collazo R, Santi D C, Einfeldt S, Funato M, Glaab J, Hagedorn S, Hirano A, Hirayama H, Ishii R 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 503001
- [10] Fei C L, Liu X L, Zhu B P, Li D, Yang X F, Yang Y T, Zhou Q F 2018 *Nano Energy* **51** 146
- [11] Ni X F, Fan Q, Hua B, Sun P H, Cai Z Z, Wang H C, Huang C N, Gu X 2020 *IEEE Trans. Electron Devices* **67** 3988
- [12] Chu Y W, Kharel P, Yoon T, Yoon T, Frunzio L, Rakich P T, Schoelkopf R J 2018 *Nature* **563** 666
- [13] Kneissl M, Seong T Y, Han J, Amano H 2019 *Nat. Photonics* **13** 233
- [14] Wu H L, Wu W C, Zhang H X, Chen Y D, Wu Z S, Wang G, Jiang H 2016 *Appl. Phys. Express* **9** 052103
- [15] Mackey T K, Contreras J T, Liang B A 2014 *Sci. Total Environ.* **472** 125
- [16] Look D C, Hemsky J W, Sizelove J R 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 2552
- [17] Peng R S, Xu S R, Fan X M, Tao H C, Su H K, Gao Y, Zhang J C, Hao Y 2023 *J. Semicond.* **44** 042801
- [18] Jena D, Gossard A C, Mishra U K 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 1707
- [19] Brazel E G, Chin M A, Narayanamurti V 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 2367
- [20] Wu H L, Zhang K, He C G, He L F, Wang Q, Zhao W, Chen Z T 2022 *Crystals* **12** 38
- [21] Tao H C, Xu S R, Zhang J C, Su H K, Gao Y, Zhang Y C, Zhou H, Hao Y 2023 *Opt. Express* **31** 20850
- [22] Tao H C, Xu S R, Su H K, et al. 2023 *Mater. Lett.* **351** 135097
- [23] Wang J M, Xie N, Xu F J, et al. 2023 *Nat. Mater.* **22** 853
- [24] Ban K, Yamamoto J, Takeda K, Ide K, Iwaya M, Takeuchi T, Kamiyama S, Akasaki I, Amano H 2011 *Appl. Phys. Express* **4** 052101
- [25] Hushur A, Manghnani M H, Narayan J 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 54317
- [26] Kozawa T, Kachi T, Kano H, Nagase H, Koide N, Manabe K 1995 *J. Appl. Phys.* **77** 4389

Ion implantation induced nucleation and epitaxial growth of high-quality AlN^{*}

Yu Sen¹⁾²⁾³⁾ Xu Sheng-Rui^{1)2)3)†} Tao Hong-Chang¹⁾³⁾ Wang Hai-Tao¹⁾²⁾³⁾
An Xia¹⁾³⁾ Yang He¹⁾³⁾ Xu Kang¹⁾²⁾ Zhang Jin-Cheng¹⁾²⁾³⁾ Hao Yue¹⁾²⁾³⁾

1) (*State Key Laboratory of Wide-Bandgap Semiconductor Devices and Integrated Technology, National Engineering Research Center of Wide Band-gap Semiconductor, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*Guangzhou Institute of Technology, Xidian University, Guangzhou 510555, China*)

3) (*Shaanxi Power Semiconductor Device Lighting Engineering Technology Research Center, Xi'an 710071, China*)

(Received 11 May 2024; revised manuscript received 31 August 2024)

Abstract

AlN materials have a wide range of applications in the fields of optoelectronic, power electronic, and radio frequency. However, the significant lattice mismatch and thermal mismatch between heteroepitaxial AlN and its substrate lead to a high threading dislocation (TD) density, thereby degrading the performance of device. In this work, we introduce a novel, cost-effective, and stable approach to epitaxially growing AlN. We inject different doses of nitrogen ions into nano patterned sapphire substrates, and then deposit the AlN layers by using metal-organic chemical vapor deposition. Ultraviolet light-emitting diode (UV-LED) with a luminescence wavelength of 395 nm is fabricated on it, and the optoelectronic properties are evaluated. Compared with the sample prepared by the traditional method, the sample injected with N ions at a dose of $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ exhibits an 82% reduction in screw TD density, the lowest surface roughness, and a 52% increase in photoluminescence intensity. It can be seen that appropriate dose of N ion implantation can promote the lateral growth and merging process in AlN heteroepitaxy. This is due to the fact that the process of implantation of N ions can suppress the tilt and twist of the nucleation islands, effectively reducing the density of TDs in AlN. Furthermore, in comparison with the controlled LED, the LED prepared on the high quality AlN template increases 63.8% and 61.7% in light output power and wall plug efficiency, respectively. The observed enhancement in device performance is attributed to the TD density of the epitaxial layer decreasing, which effectively reduces the nonradiative recombination centers. In summary, this study indicates that the ion implantation can significantly improve the quality of epitaxial AlN, thereby facilitating the development of high-performance AlN-based UV-LEDs.

Keywords: AlN, ion implantation, metal-organic chemical vapor deposition, light emitting diode

PACS: 61.72.uj, 61.72.Ff, 81.15.Kk, 85.60.Jb

DOI: [10.7498/aps.73.20240674](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240674)

CSTR: [32037.14.aps.73.20240674](https://cstr.cn/32037.14.aps.73.20240674)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFB3604400) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62074120, 62134006).

† Corresponding author. E-mail: srxu@xidian.edu.cn



离子注入诱导成核外延高质量AlN

余森 许晟瑞 陶鸿昌 王海涛 安瑕 杨赫 许钰 张进成 郝跃

Ion implantation induced nucleation and epitaxial growth of high-quality AlN

Yu Sen Xu Sheng-Rui Tao Hong-Chang Wang Hai-Tao An Xia Yang He Xu Kang Zhang Jin-Cheng Hao Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 196101 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240674

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240674>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于改性空穴注入层与复合发光层的高效钙钛矿发光二极管

Perovskite light-emitting diode based on combination of modified hole-injection layer and polymer composite emission layer

物理学报. 2021, 70(4): 048502 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201379>

基于离子注入隔离的微缩化发光二极管阵列性能

Ion implantation isolation based micro-light-emitting diode device array properties

物理学报. 2020, 69(2): 027802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191418>

无注入型发光二极管的载流子输运模型研究

Carrier transport model of non-carrier-injection light-emitting diode

物理学报. 2023, 72(4): 048503 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221831>

钙钛矿发光二极管光提取性能增强的研究进展

Research progress of enhancing perovskite light emitting diodes with light extraction

物理学报. 2020, 69(21): 218501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200755>

溶液法制备的金属掺杂氧化镍空穴注入层在钙钛矿发光二极管上的应用

Perovskite light-emitting diodes based on solution-processed metal-doped nickel oxide hole injection layer

物理学报. 2020, 69(1): 018101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191269>

基于缺陷态钝化的高效稳定蓝光钙钛矿发光二极管

Efficient and stable blue perovskite light emitting diodes based on defect passivation

物理学报. 2020, 69(13): 138502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200566>