

Si 衬底上基于诱导成核技术的高质量 GaN 外延

许 锐^{1,2}, 许晟瑞^{1,2}, 陶鸿昌^{1,2}, 苏华科^{1,2}, 高 源^{1,2}, 杨 赫^{1,2}, 安 瑕^{1,2},
黄 俊³, 张进成^{1,2}, 郝 跃^{1,2}

(1. 西安电子科技大学集成电路学部, 陕西西安 710071; 2. 宽禁带半导体器件与集成技术全国重点实验室, 陕西西安 710071;
3. 湖北九峰山实验室, 湖北武汉 430074)

摘 要: 氮化镓(GaN)具有直接带隙、高频、大功率和高电子迁移率等优良的材料特性,使其在电力电子和光电器件等领域都具有广阔的应用前景。Si 衬底具备大尺寸、低成本和工艺兼容性好等优势,所以 Si 基 GaN 具有很高的研究价值和商业价值。GaN 材料的晶体质量决定着 GaN 基器件的性能,但 Si 基 GaN 的晶体质量较差,为此研究人员提出了多种方法来提高 GaN 的晶体质量,但都存在工艺复杂或成本高昂等问题。因此,本研究提出一种工艺简单且成本低的诱导成核技术来获取高质量的 Si 基 GaN 材料。对 Si 衬底完成相同剂量的 N 离子注入后进行不同时间的快速热退火处理,使用金属有机化学气相沉积法进行外延生长。结果表明,退火时间为 6 min 的样品具有最好的晶体质量,表面形貌和光学性能,与对照样品相比,螺位错密度降低 14.7%,刃位错密度降低 34.4%,总位错密度降低 26.1%,并且提高了 AlGaIn/GaN 异质结界面的二维电子气面密度和电子迁移率,提高了 AlGaIn/GaN 异质结的电学性能。

关键词: 氮化镓; 诱导成核; 快速热退火; 金属有机化学气相沉积; 位错密度; 光学性能; 电学性能

基金项目: 国家自然科学基金(No.62074120); 国家资助博士后研究人员计划(No.GZC20241306); 湖北省开发项目(No.2022BFE001)

中图分类号: TN303; TN325+3 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2024)12-3907-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240662

High Quality GaN Epitaxy Based on Induced Nucleation Technology on Si Substrate

XU Kang^{1,2}, XU Sheng-rui^{1,2}, TAO Hong-chang^{1,2}, SU Hua-ke^{1,2}, GAO Yuan^{1,2}, YANG He^{1,2}, AN Xia^{1,2},
HUANG Jun³, ZHANG Jin-cheng^{1,2}, HAO Yue^{1,2}

(1. Department of Integrated Circuits, Xi'an University of Electronic Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. State Key Laboratory of Broadband Gap Semiconductor Technology, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

3. Hubei Jiufengshan Laboratory, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: GaN has excellent material properties such as direct bandgap, high frequency, high power, and high electron mobility, making them have broad application prospects in fields such as power electronic devices and optoelectronic devices. Si substrates have advantages such as large size, low cost, and good process compatibility, so the GaN-on-Si has high research and commercial value. The crystal quality of GaN materials determines the performance of GaN based devices, but the crystal quality of GaN-on-Si is poor. So, researchers have proposed various methods to improve the crystal quality of GaN, but all of them have problems such as complex processes or high costs. Therefore, this research proposes a simple and low-cost induced nucleation technique to obtain high-quality Si based GaN materials. After completing the same dose of N ion implantation on Si substrate, rapid thermal annealing (RTA) treatment was carried out for different times, and epitaxial growth was carried out using metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) method. The results showed that the sample with an annealing time of 6 minutes had the best crystal quality, surface morphology, and optical performance. Compared with the control sample, the screw dislocation density decreased by 14.7%, the edge dislocation density decreased by 34.4%, the total dislocation density decreased by 26.1%, and the two-dimensional electron gas (2DEG) surface density and electron mobility at the AlGaIn/GaN heterojunction interface were improved, which improved the electrical performance of the AlGaIn/GaN heterojunction.

Key words: gallium nitride; induced nucleation; rapid thermal annealing; metal organic chemical vapor deposition; dislocation density; optical performance; electrical performance

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62074120); Postdoctoral Fellowship Program of CPSF (No.GZC20241306); Local Science and Technology Development Project of Hubei Province (No.2022BFE001)

1 引言

Ⅲ族氮化物半导体及其相关合金材料具有直接带隙、高击穿电压以及高电子饱和速率等优良的材料特性,在电力电子、微波和光电领域具有广阔的应用前景^[1-6]. 其中,氮化镓(GaN)作为第三代半导体材料的代表,其具有高频、大功率、耐高温以及耐高压等优点,并且AlGaIn/GaN异质结界面存在由极化效应产生的高密度、高迁移率的二维电子气(Two-Dimensional Electron Gas, 2DEG),这使得GaN基高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistors, HEMTs)在高频和大功率器件领域具有良好的应用潜力^[7-12]. 此外,氮化物合金材料($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$)的禁带宽度在0.7 eV到6.2 eV之间可调,使得Ⅲ族氮化物及其合金材料的发光波长不仅涵盖了整个可见光波段,还可以达到深紫外和红外波段. 因此,GaN材料在发光二极管(Light Emitting Diode, LED)以及激光二极管(Laser Diode, LDs)领域也具有很好的发展和应用前景^[13].

由于GaN没有天然单晶存在,且GaN单晶的制备非常困难,使得GaN材料的外延生长都采用异质外延的方法,异质外延过程中的晶格失配和热失配会导致大应力和高位错密度等问题^[14]. 而位错在电子器件中作为漏电通道,会减小器件的击穿电压以及饱和电流,降低器件的性能和寿命;在光电器件中作为非辐射复合中心,降低器件的发光效率. 所以,制备高质量的GaN材料是实现高性能器件的基础.

目前外延GaN材料的衬底主要有Si、SiC和蓝宝石. 与其他两种衬底材料相比,Si衬底具有大尺寸、低成本、工艺兼容性好以及能够在在大尺寸Si晶片上集成Si基器件和电路等优势,所以Si基GaN材料外延具有很大的研究价值^[15]. 然而,Si与GaN之间存在17%的晶格失配和54%的热失配,这使得Si衬底上外延出的GaN材料受到很大的应力,进而导致GaN层存在大量位错和表面开裂现象^[16]. 为了解决这一问题,获得高质量的Si基GaN材料及器件, Lee等人^[17]提出了一种通过改变有机源的V/Ⅲ比和生长压强的方法来获得两层不同晶粒尺寸的GaN层,从而调节应力状态和降低位错密度. 此外,还有研究人员提出了C掺杂技术,磁控溅射AlN技术以及多孔Si衬底技术等^[18-20]. 但是,这些方法大多存在工艺复杂以及成本较高等弊端.

针对上述问题,本研究提出了一种基于Si衬底的诱导成核技术来提高GaN晶体质量的方法. 此前,本文

研究团队已经证明了诱导成核技术在蓝宝石衬底上能够显著提升GaN的晶体质量^[21]. 但蓝宝石衬底的硬度大,受离子注入的影响较小,而硅衬底更容易受到注入损伤的影响. 本研究使用N离子注入技术获得了4片相同注入剂量的Si衬底,并分别进行不同时间的快速热退火(Rapid Thermal Annealing, RTA)处理,在恢复损伤的同时保留合适密度的成核点. 随后采用金属有机化学气相沉积法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)进行外延生长. 外延生长后的测试结果证明,诱导成核技术能够有效提升Si基GaN的晶体质量,提高GaN的表面形貌以及提升GaN的光学和电学性能.

2 实验

本研究使用的Si衬底均为Si(111)衬底,尺寸为6英寸,厚度约为1 mm. 首先,将准备好的5片Si衬底分别记为衬底1~衬底5. 然后,对衬底2~衬底5进行预处理,衬底1作为对照样品. 在室温下,运用Sumitomo NV-GSD/HE型离子注入设备,以偏离表面法线 7° 的入射角对衬底2~衬底5进行N离子注入,其注入剂量均为 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$,注入能量均为30 KeV. 由于离子注入会对衬底表面造成晶格损伤,且Si衬底与蓝宝石衬底不同,Si的材料硬度要比蓝宝石小,离子注入在Si衬底表面造成的损伤会更加严重. 为避免损伤过重而影响材料外延,在离子注入完成后,使用AS-One 150型RTA设备对离子注入后的衬底2~衬底5进行不同时间的退火处理来降低由离子注入引起的晶格损伤. 衬底2~衬底5的预处理条件如表1所示.

表1 衬底2~衬底5的预处理条件

| 编号 | 离子注入元素 | 注入剂量和能量 | 退火条件 |
|-----|--------|---|--------------------------------|
| 衬底2 | N | $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 30 KeV | 900 °C, 4 min, N ₂ |
| 衬底3 | N | $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 30 KeV | 900 °C, 6 min, N ₂ |
| 衬底4 | N | $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 30 KeV | 900 °C, 8 min, N ₂ |
| 衬底5 | N | $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 30 KeV | 900 °C, 10 min, N ₂ |

衬底5在离子注入前、离子注入后以及退火后的原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)测试结果如图1所示. 可以看出在离子注入之前,衬底表面不存在晶格损伤. 经过离子注入以后,衬底表面出现了密集的黑点,也就是离子注入引起的晶格损伤. 在进行了10 min的RTA处理后,由离子注入导致的晶格损伤基本全部恢复. 因此,通过表面形貌的变化不仅可以看出离子注入确实会对衬底造成晶格损伤,还可以证明RTA处理能够有效降低离子注入造成的损伤.

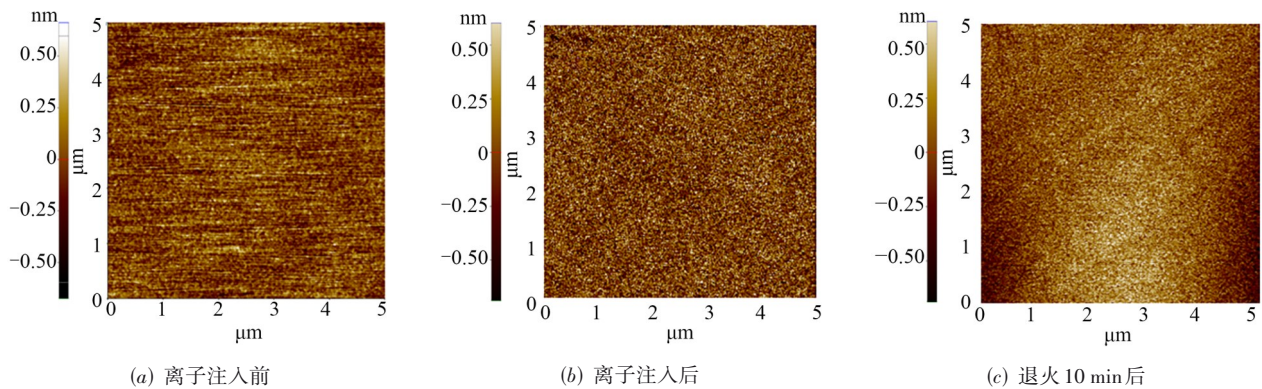


图1 衬底5的AFM测试结果

完成 RTA 处理以后,使用型号为 Prismo PD5 的 MOCVD 设备,分别以三甲基铝 (TMAI)、三甲基镓 (TMGa) 和氨气 (NH_3) 作为铝源、镓源和氮源,以 N_2 作为载气,将所有样品放入反应室进行 Si 基 AlGaIn/GaN 异质结的外延生长,研究采用的外延结构如图 2 所示.

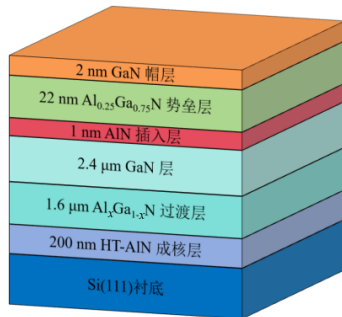


图2 AlGaIn/GaN 异质结的外延结构示意图

首先,设置生长温度为 1090°C ,生长厚度为 200 nm 的高温氮化铝 (HT-AlN) 成核层. 随后,在 995°C 下生长厚度为 $1.6\ \mu\text{m}$ 的 Al 组分渐变的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 过渡层 (x 为 Al 组分,从 0.75 到 0.15 渐变),该结构主要是为了调节衬底和外延层之间的应力. 然后,在 1065°C 下生长一层厚度为 $2.4\ \mu\text{m}$ 的 GaN 层. 在外延生长完 GaN 层后,将温度设置为 1040°C ,生长一层厚度为 1 nm 的 AlN 插入层,用来增强异质结之间的极化效应和降低电子受到的合金无序散射,进而增加异质结之间的 2DEG 面密度和电子迁移率^[22]. 接下来,同样在 1040°C 的温度下,生长一层厚度为 22 nm 的 AlGaIn 势垒层,与 GaN 层构成 AlGaIn/GaN 异质结,在势垒层之上是 GaN 帽层,用来降低欧姆接触电阻.

将衬底 1~衬底 5 上生长的外延结构分别记为样品 1~样品 5,使用 X'Pert3 MRD 型的高分辨 X 射线衍射仪 (High Resolution X-Ray Diffraction, HRXRD) 进行测试,

对 GaN 层的晶体质量进行表征;使用 Horiba Jobin Yvon LavRam HR800 型光谱仪进行拉曼散射和光致发光 (PhotoLuminescence, PL) 测试,研究 GaN 层的应力状态和光学性能;使用 Bruker ICON 型 AFM 设备对样品的表面形貌进行表征;使用 Lake Shore 8400 Series 型接触式霍尔测试仪对 AlGaIn/GaN 异质结进行霍尔测试,研究该异质结的电学性能.

3 结果和分析

3.1 HRXRD 测试

由 HRXRD 测试所得的样品 1~样品 5 的 GaN 在 (002) 和 (102) 晶面的摇摆曲线 (Rocking Curve, RC) 如图 3 所示. 其中样品 1~样品 5 的 (002) 晶面的半高宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 分别为 420 arcsec 、 407 arcsec 、 388 arcsec 、 405 arcsec 和 424 arcsec , (102) 晶面的 FWHM 分别为 778 arcsec 、 697 arcsec 、 630 arcsec 、 695 arcsec 和 804 arcsec . 其中样品 3 的 HRXRD 结果表明外延的 Si 基 GaN 具有很高的晶体质量^[23-25]. 研究表明, (002) 晶向的 FWHM 与螺位错密度成正比, (102) 晶向的 FWHM 与刃位错密度成正比^[26]. 而且 GaN 层中的位错密度可以根据样品在 HRXRD 测试获得的 RC 的 FWHM 进行计算,具体表达式^[27]如下:

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

式(1)中,TD 表示总位错密度; 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) 晶面的伯格矢量 (Burgers Vector), 此处取值分别为 0.5185 nm 和 0.3189 nm , 具体的计算结果呈现在表 2 中.

从表 2 可以看出,样品 3 具有最小的位错密度,说明该样品的晶体质量最好. 对比发现,样品 3 与未进行离子注入和 RTA 处理的样品 1 相比,螺位错密度降低了 14.7% ,刃位错密度降低了 34.4% ,总位错密度降低

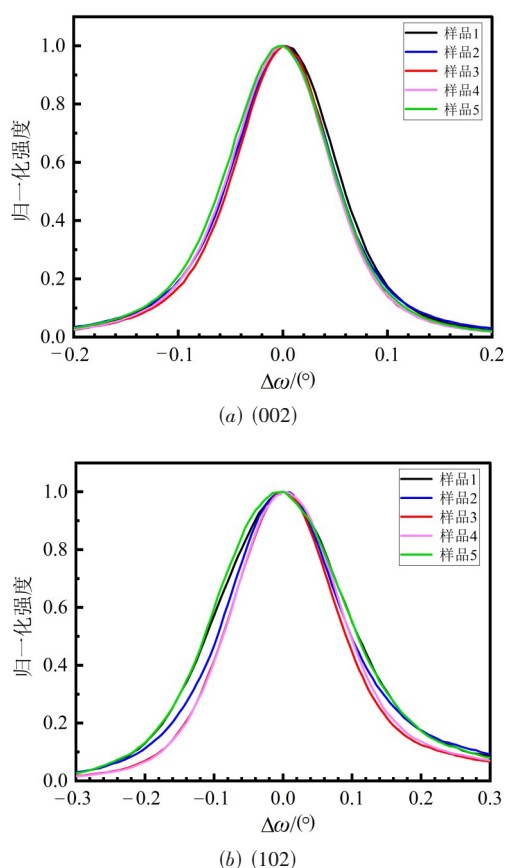


图3 样品1~样品5的GaN在(002)和(102)晶面的RC

表2 样品1~样品5在(002)和(102)晶面的FWHM和位错密度

| 编号 | (002)/ arcsec | (102)/ arcsec | 螺位错 密度/cm ⁻² | 刃位错 密度/cm ⁻² | 总位错 密度/cm ⁻² |
|-----|------------------|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 样品1 | 420 | 778 | 3.54×10 ⁸ | 3.20×10 ⁹ | 3.26×10 ⁹ |
| 样品2 | 407 | 697 | 3.32×10 ⁸ | 2.56×10 ⁹ | 2.91×10 ⁹ |
| 样品3 | 388 | 630 | 3.02×10 ⁸ | 2.10×10 ⁹ | 2.41×10 ⁹ |
| 样品4 | 405 | 695 | 3.29×10 ⁸ | 2.56×10 ⁹ | 2.89×10 ⁹ |
| 样品5 | 424 | 804 | 3.60×10 ⁸ | 3.43×10 ⁹ | 3.79×10 ⁹ |

了26.1%。证明对Si(111)衬底进行剂量为 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 的N离子注入和6 min 900 °C的RTA处理能够有效降低GaN层中的位错密度,提升Si基GaN的晶体质量。这是因为离子注入使得整个衬底表面存在一定密度的注入坑(即晶格损伤),该注入坑本身和其周围的表面悬挂键(注入离子破坏了Si-Si键所致)能够增加有机源在该处的黏附性,这不仅为成核层增加了成核位点,还能够诱导成核层进行高质量成核,促使成核岛有序排列,进而降低了位错的产生。对比样品1~样品5的数据可以发现,适当时间的RTA处理可以提高GaN的晶体质量,但长时间的RTA处理反而会使得GaN的晶体质量恶化,这是因为长时间的RTA处理恢复了绝大多数的注入损伤(图1(c)),表面仅存的少数注入坑和悬挂键难

以提高成核层的质量。

3.2 AFM测试

为了分析本研究所用方法对GaN表面形貌的影响,对样品1~样品5进行了AFM测试,测试结果呈现在图4中。样品1~样品5的表面均方根粗糙度(Root Mean Square, RMS)分别为0.514 nm、0.410 nm、0.323 nm、0.363 nm和0.382 nm。与样品1相比较,样品2~样品5的表面形貌都得到了很好的改善,并且RMS都有所下降。其中样品3的RMS最小,具有最好的表面形貌,如图4(c)所示。该结果表明,本研究所用的方法不仅能够提高GaN的晶体质量,还能够有效改善样品的表面形貌。

3.3 拉曼散射测试

为了研究GaN层的应力状态,在室温下(300 K)对样品1~样品5进行了拉曼散射测试。测试系统使用的光源为发光波长为633 nm的激光器,测试所得拉曼图谱呈现在图5中。

GaN在无应力状态下的 $E_2(\text{high})$ 峰位(以原子的拉伸和压缩为主的声子峰)位于 567.5 cm^{-1} ,图5中用红色虚线表示。图5中还能够看到位于 735 cm^{-1} 左右的GaN $A_1(\text{LO})$ 峰位,说明GaN层具有较好的晶体质量^[28]。当GaN层受到应力时,其 $E_2(\text{high})$ 对应的峰位会发生频移,若受到张应力会向左发生频移,若受到压应力则向右发生频移^[28]。测得样品1~样品5的GaN $E_2(\text{high})$ 峰位分别位于 567.5 cm^{-1} 、 567.5 cm^{-1} 、 567.8 cm^{-1} 、 567.8 cm^{-1} 和 568.1 cm^{-1} ,表明外延层受到的应力均较小。同时,对应的FWHM分别为 9.8 cm^{-1} 、 9.7 cm^{-1} 、 8.9 cm^{-1} 、 9.6 cm^{-1} 和 10.1 cm^{-1} 。由于GaN $E_2(\text{high})$ 模的FWHM会随晶体质量的提高而减小^[29],所以该结果不仅说明样品1~样品5的GaN层都具有良好的应力状态,还可以说明具有最小FWHM的样品3具有最好的晶体质量,拉曼测试的结果验证了HRXRD的测试结果。

3.4 PL测试

为了表征GaN层的光学性能,在室温下采用发光波长为325 nm的激光器作为激励源对样品1~样品5进行了PL测试,测试所得PL光谱如图6所示。

样品1~样品5的GaN发光波长分别为364.8 nm、364.8 nm、365.2 nm、364.4 nm和364.8 nm,均在GaN的本征发光波长(365 nm)附近。并且发现样品1~样品5的发光强度与HRXRD的测试结果呈现出相同趋势,强度随着RTA的处理时间先增加后降低,其中样品3表现出最高的发光强度,与样品1相比,发光强度提高了74.3%。这是因为位错在GaN中作为非辐射复合中心,导致发光效率降低^[30]。所以,该测试结果不仅进一步证明了样品3的晶体质量最好,还表明了本研究采用的方

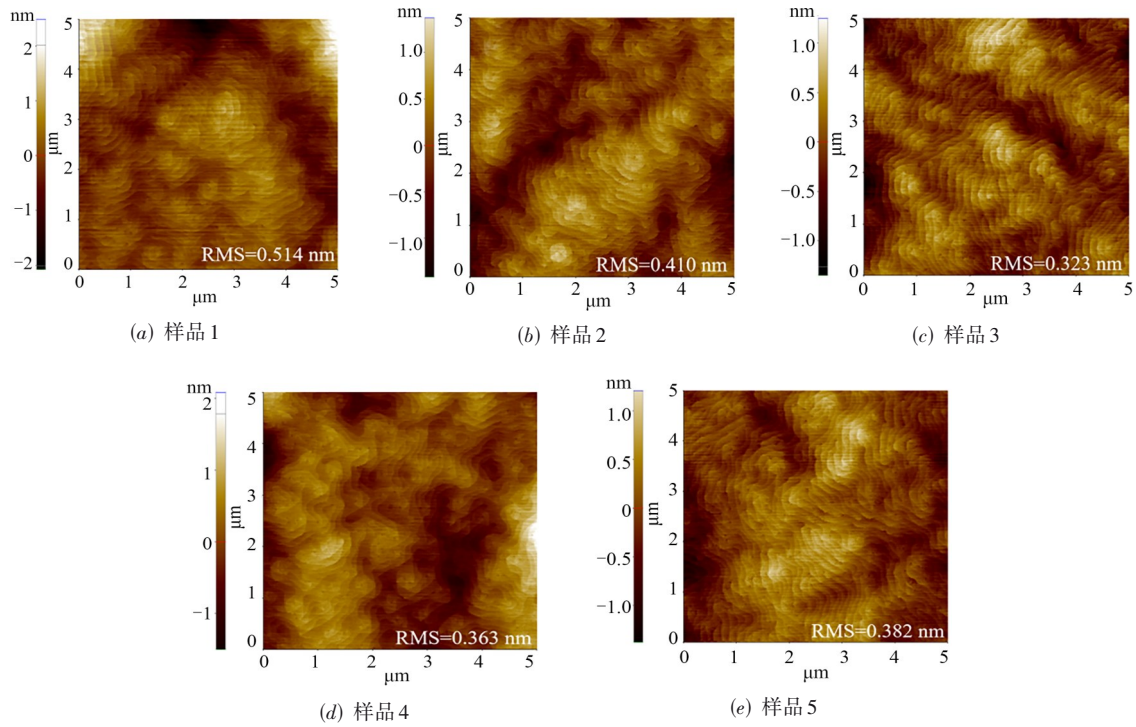


图 4 5 μm × 5 μm 的 AFM 测试结果

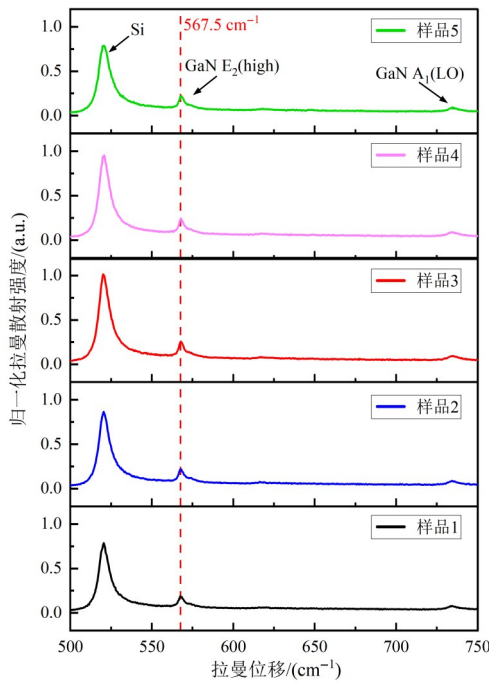


图 5 样品 1~样品 5 的拉曼图谱

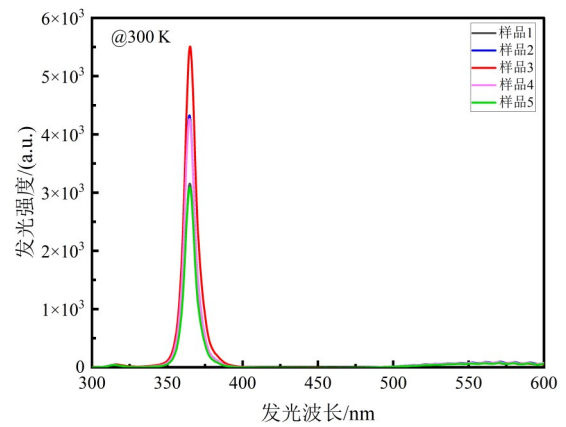


图 6 样品 1~样品 5 的 PL 光谱

学性能是通过 2DEG 面密度, 电子迁移率以及方块电阻的数值进行判断, 霍尔测试结果呈现在表 3 中.

表 3 样品 1、样品 3 的霍尔测试结果

| 编号 | 电子迁移率/(cm ² /(V·s)) | 2DEG 面密度/ (×10 ¹³ cm ⁻²) | 方块电阻/(Ω/□) |
|------|--------------------------------|--|------------|
| 样品 1 | 1 310 | 1.35 | 352 |
| 样品 3 | 1 343 | 1.54 | 302 |

法能显著提升 Si 基 GaN 的光学性质.

3.5 霍尔测试

基于上述结果, 选取样品 1 和样品 3 进行常温接触式霍尔测试, 来研究本文所采用的方法对 AlGaIn/GaN 异质结电学性能的影响. 通常, AlGaIn/GaN 异质结的电

电子迁移率与位错散射, 电子之间的散射以及界面粗糙度散射等散射机制有关, 即位错密度、2DEG 面密度以及界面粗糙度越高, 电子受到的散射作用就越强, 最终会导致电子迁移率下降^[31]. 从表 3 中可以看

出,与样品 1 相比,样品 3 的电子迁移率和 2DEG 面密度都有所提高,方块电阻大幅度降低,证明本研究所采用的方法能够有效提高 2DEG 面密度和电子迁移率. 结合 HRXRD 和 AFM 测试结果分析发现,样品 3 在 2DEG 面密度增加的情况下,其电子迁移率还能得到提高,这得益于位错密度和界面粗糙度的降低,减少了电子受到的散射. 该结果表明,本方法在提高电子器件的饱和电流和降低导通电阻等方面具有很好的前景,也说明本研究采用的方法在 Si 基电子器件领域具有广阔的应用前景.

4 总结

本研究提供了一个对 Si 衬底进行离子注入诱导成核的方法,用于提高 Si 基 GaN 的晶体质量. HRXRD、AFM、拉曼散射以及 PL 测试结果表明,该方法能够有效降低 GaN 外延层中的位错密度,提高 GaN 的晶体质量,使 GaN 在(002)和(102)晶面的 FWHM 分别由 420 arcsec 和 778 arcsec 降低至 388 arcsec 和 630 arcsec,使得螺位错密度降低 14.7%,刃位错密度降低 34.4%,总位错密度降低 26.1%. 而且,该方法还能很好地改善 GaN 的表面形貌,提高 GaN 的发光强度. 霍尔测试结果表明,该方法还可以有效提升 2DEG 的面密度和迁移率,说明该方法能够通过提高 GaN 的晶体质量来提高 AlGaIn/GaN 异质结的电学性能. 而且,注入离子选取的依据是对 Si 衬底造成的注入损伤较小,所以离子注入的元素只要具有与 Si 原子接近的原子半径即可,因此注入离子不仅限于 N 离子,具有广泛的注入离子选取范围. 更重要的是, MOCVD 和离子注入都是半导体技术中的标准工艺,具有较高的重复性. 综上所述,本研究提供的方法在高质量 Si 基 GaN 材料外延以及高性能 Si 基 GaN 器件制备等领域具有广阔的应用前景.

参考文献

- [1] WENG Y C, HSU H T, TSAO Y F, et al. Effects on RF performance for AlGaIn/GaN HEMT on Si substrate with AlGaIn buffer engineering[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2023, 12(3): 035002.
- [2] LI G Q, WANG W L, YANG W J, et al. GaN-based light-emitting diodes on various substrates: A critical review[J]. Reports on Progress in Physics. Physical Society (Great Britain), 2016, 79(5): 056501.
- [3] 杨燕, 王平, 郝跃, 等. AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管解析模型[J]. 电子学报, 2005, 33(2): 205-208.
YANG Y, WANG P, HAO Y, et al. Analytical model for AlGaIn/GaN high electron mobility transistor[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(2): 205-208. (in Chinese)
- [4] SU H K, XU S R, TAO H C, et al. Improving the current spreading by Fe doping in n-GaN layer for GaN-based ultraviolet light-emitting diodes[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(9): 1346-1349.
- [5] 邵国键, 林罡, 白霖, 等. 帽层结构对 GaN HEMT 器件性能的影响[J]. 固体电子学研究与进展, 2020, 40(6): 466-470.
SHAO G J, LIN G, BAI L, et al. Effect of cap layer structure on the performance of GaN HEMT device[J]. Research & Progress of SSE, 2020, 40(6): 466-470. (in Chinese)
- [6] MENEGHINI M, DE SANTI C, ABID I, et al. GaN-based power devices: Physics, reliability, and perspectives[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 130(18): 181101.
- [7] WANG Z M, YU G H, YUAN X, et al. Low leakage current in isolated AlGaIn/GaN heterostructure on Si substrate by N ion implantation performed at an elevated temperature[J]. Applied Physics Letters, 2023, 122(6): 062105.
- [8] 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.
- [9] NANJO T, TAKEUCHI M, IMAI A, et al. AlGaIn channel HEMT with extremely high breakdown voltage[J]. MRS Online Proceedings Library, 2011, 1324(1): 1101.
- [10] 季启政, 刘峻, 杨铭, 等. 栅宽对 AlGaIn/GaN HEMTs 亚阈值摆幅的影响[J]. 电子学报, 2023, 51(6): 1486-1492.
JI Q Z, LIU J, YANG M, et al. Gate width influence on subthreshold swing of AlGaIn/GaN HEMTs[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(6): 1486-1492. (in Chinese)
- [11] YAMASAKI T, KITAKA Y, MINAMIDE H, et al. A 68% efficiency, C-band 100 W GaN power amplifier for space applications[C]//2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Piscataway: IEEE, 2010: 1384-1387.
- [12] YAMANAKA K, MORI K, IYOMASA K, et al. C-band GaN HEMT power amplifier with 220 W output power[C]//2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. Piscataway: IEEE, 2007: 1251-1254.
- [13] 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[J]. Materials, 2020, 13(18): 3933.
- [14] JIANG H H, LI X J. GaN MSM structure UV photodetector based on nonplanar Si substrate and its performance optimization[J]. Semiconductor Science and Technology, 2022, 37(10): 105020.

- [15] WANG K, LI M D, YANG Z J, et al. Stress control and dislocation reduction in the initial growth of GaN on Si(111) substrates by using a thin GaN transition layer[J]. *CrystrEngComm*, 2019, 21(32): 4792-4797.
- [16] LIN Y H, YANG M J, WANG W L, et al. Quality-enhanced GaN epitaxial films on Si(111) substrates by in situ deposition of SiN on a three-dimensional GaN template[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(88): 84794-84800.
- [17] LEE J H, IM K S. Growth of high quality GaN on Si(111) substrate by using two-step growth method for vertical power devices application[J]. *Crystals*, 2021, 11(3): 234.
- [18] YANG X L, SHEN J F, CAI Z D, et al. Effect of carbon impurity on the dislocation climb in epitaxial GaN on Si substrates[J]. *Applied Physics Express*, 2022, 15(10): 105501.
- [19] RIAH B, CAMUS J, AYAD A, et al. Hetero-epitaxial growth of AlN deposited by DC magnetron sputtering on Si(111) using a AlN buffer layer[J]. *Coatings*, 2021, 11(9): 1063.
- [20] JIN Z Y, GUO L, XIAO L, et al. Epitaxial growth of GaN on porous Si(111) substrate[C]//2016 5th International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE). Piscataway: IEEE, 2016: 1-3.
- [21] 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[J]. *Optics Express*, 2023, 31(13): 20850-20860.
- [22] GUO L C, WANG X L, WANG C M, et al. The influence of 1 nm AlN interlayer on properties of the $Al_{0.3}Ga_{0.7}N/AlN/GaN$ HEMT structure[J]. *Microelectronics Journal*, 2008, 39(5): 777-781.
- [23] WANG W K, JIANG M C. Growth behavior of hexagonal GaN on Si(100) and Si(111) substrates prepared by pulsed laser deposition[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(9): 095503.
- [24] KADIR A, SRIVASTAVA S, LI Z, et al. Influence of substrate nitridation on the threading dislocation density of GaN grown on 200 mm Si(111) substrate[J]. *Thin Solid Films*, 2018, 663: 73-78.
- [25] LIN P J, TIEN C H, WANG T Y, et al. On the role of AlN insertion layer in stress control of GaN on 150-mm Si(111) substrate[J]. *Crystals*, 2017, 7(5): 134.
- [26] MORAM M A, VICKERS M E. X-ray diffraction of III-nitrides[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2009, 72(3): 036502.
- [27] BANK, YAMAMOTO J I, TAKEDA K, et al. Internal quantum efficiency of whole-composition-range AlGaIn multi-quantum wells[J]. *Applied Physics Express*, 2011, 4(5): 052101.
- [28] 冯倩, 郝跃, 刘玉龙. GaN 薄膜拉曼散射光谱的研究[J]. *光散射学报*, 2003, 15(3): 175-178.
FENG Q, HAO Y, LIU Y L. A study on Raman scattering spectra of GaN film[J]. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2003, 15(3): 175-178. (in Chinese)
- [29] JIANG T, XU S R, ZHANG J C, et al. Spatially resolved and orientation dependent Raman mapping of epitaxial lateral overgrowth nonpolar a-plane GaN on r-plane sapphire[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19955.
- [30] TAO H C, XU S R, SU H K, et al. Improved crystal quality of AlGaIn by Al ion-implantation sapphire substrate[J]. *Materials Letters*, 2023, 351: 135097.
- [31] 张金凤, 郝跃, 张进城, 等. 变 Al 组分 AlGaIn/GaN 结构中的二维电子气迁移率[J]. *中国科学(E 辑: 信息科学)*, 2008, 38(6): 949-958.
ZHANG J F, HAO Y, ZHANG J C, et al. Two-dimension Al electron gas mobility in AlGaIn/GaN structure with variable al composition[J]. *Science in China (Series E (Information Sciences))*, 2008, 38(6): 949-958. (in Chinese)

作者简介



许 钰 男, 2000 年出生于山东省临沂市。现为西安电子科技大学集成电路学部硕士研究生。主要研究方向为 Si 基 GaN 材料外延和器件制备。

E-mail: 1519685775@qq.com



许晟瑞 男, 现为西安电子科技大学集成电路学部教授, 博士生导师。共发表学术论文 132 篇, 主持国家自然科学基金 3 项, 获得陕西省科学技术一等奖, 入选陕西省杰出青年。

E-mail: srxu@xidian.edu.cn



陶鸿昌 男, 1997 年出生于安徽省阜阳市。于 2023 年获得西安电子科技大学博士学位。共发表学术论文 10 余篇。主要研究方向为宽带隙半导体和氮化物 LED。

E-mail: taohongchang@xidian.edu.cn