

# 斜切蓝宝石衬底上 GaN 薄膜的位错降低机制\*

徐爽 许晟瑞<sup>†</sup> 王心颢 卢灏 刘旭 负博祥  
张雅超 张涛 张进成 郝跃

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体国家工程研究中心, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2023 年 5 月 16 日收到; 2023 年 7 月 28 日收到修改稿)

GaN 材料以其宽禁带、高击穿电场、高热导率、直接带隙等优势被广泛应用于光电子器件、大功率器件以及高频微波器件等方面. 由于 GaN 材料异质外延带来的大晶格失配和热失配问题, GaN 在生长过程中会产生大量位错, 降低了 GaN 材料晶体质量, 导致器件性能难以进一步提升. 为此, 研究人员提出使用斜切衬底来降低位错密度, 但是关于斜切衬底上外延层的位错湮灭机制的研究还不充分. 所以, 本文采用金属有机化合物化学气相淀积技术在不同角度的斜切蓝宝石衬底上生长了 GaN 薄膜, 采用原子力显微镜、高分辨 X 射线衍射仪、光致发光测试、透射电子显微镜详细地分析了斜切衬底对 GaN 材料的影响. 斜切衬底可以显著降低 GaN 材料的位错密度, 但会导致其表面形貌发生退化. 并且衬底斜切角度越大, 样品的位错密度越低. 通过透射电子显微镜观察到了斜切衬底上特殊的位错终止现象, 这是斜切衬底降低位错密度的主要原因之一. 基于上述现象, 提出了斜切衬底上 GaN 生长模型, 解释了斜切衬底提高 GaN 晶体质量的原因.

**关键词:** 斜切蓝宝石衬底, GaN, 位错终止, 透射电子显微镜

**PACS:** 61.72.uj, 61.72.Ff, 68.37.Lp, 81.15.Kk

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230793

## 1 引言

GaN 材料作为第三代半导体的代表性材料, 具有宽的直接带隙、高击穿电场、高电子饱和漂移速度、高热导率、强抗辐照能力等许多优良特性, 在光电子器件和高频微波器件等领域具有广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>. 高性能器件的基础是高质量的 GaN 材料制备, 但是由于 GaN 体单晶衬底的尺寸以及成本限制, 目前绝大多数 GaN 材料是在蓝宝石、碳化硅、硅等衬底上异质外延得到的. 异质衬底和 GaN 材料之间的大晶格失配和热失配使得 GaN 外延材料中的位错密度非常高, 一般在  $10^8 \text{ cm}^{-2}$  以上<sup>[5]</sup>. 高位错密度会对器件产生不利影响, 在电

子器件中, 位错加剧二维电子气的散射, 降低载流子迁移率, 并且位错充当漏电通道, 会增加器件的漏电流; 在光电器件中, 位错充当非辐射复合中心, 会降低器件的发光效率<sup>[6-8]</sup>. 因此, 目前有很多研究是针对如何降低 GaN 材料的位错密度, 提高 GaN 材料的晶体质量.

经过几十年的不断研究, 研究人员提出了多种方法来降低 GaN 薄膜的位错密度, 比如横向外延生长 (epitaxial lateral overgrowth, ELOG)<sup>[9]</sup>、图形化衬底 (patterned sapphire substrate, PSS)<sup>[10]</sup>、超晶格位错阻挡层<sup>[11]</sup>、斜切衬底<sup>[12]</sup>等. 其中, ELOG 技术需要光刻掩膜, PSS 技术需要进行衬底刻蚀, 超晶格位错阻挡层需要生长额外结构, 这些技术都或多或少会引入新的外延结构或工艺步骤, 成本较

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3604400)、国家自然科学基金 (批准号: 62074120, 62134006) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: JB211108) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [srxu@xidian.edu.cn](mailto:srxu@xidian.edu.cn)

高,特别是 ELOG 技术还会引入非故意掺入的 Si 杂质,导致 GaN 层漏电.而斜切衬底制备简单,与现有生长工艺完全兼容,可以在不增加额外工序的前提下提高 GaN 外延层的晶体质量,大幅降低了生产成本,因此斜切衬底受到了研究人员的密切关注,在各个领域都得到了广泛应用. Shen 等<sup>[13]</sup>报道了在斜切蓝宝石衬底上使用等离子体辅助分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 生长的 AlN 薄膜,在 0.5°斜切衬底上得到了质量最好的 AlN 薄膜,(002) 面半峰全宽低至 70". Chang 等<sup>[14]</sup>使用斜切角度为 1°的蓝宝石衬底有效提高了 AlGaIn/GaN 异质结的晶体质量,位错密度可降低约 1 个数量级. Zhang 等<sup>[15]</sup>研究了衬底斜切角度对 GaN 基高电子迁移率晶体管器件性能的影响,研究发现二维电子气迁移率、器件最大输出电流等性能随衬底斜切角度的增加而提升,器件性能的改善归因于材料晶体质量的提高以及衬底台阶对载流子传输的影响. Fan 等<sup>[16]</sup>在斜切 2°的蓝宝石衬底上外延生长了 InGaIn/GaN 多量子阱结构,研究发现斜切衬底可以显著降低外延层的位错密度以及应力,进而大幅提高了多量子阱结构的发光效率.

关于斜切衬底降低位错密度的机制,研究人员也开展了大量的工作. Shen 等<sup>[17]</sup>利用截面透射电子显微镜观察了斜切衬底上 GaN 外延层中的位错传播情况,发现斜切衬底上的台阶可以显著改善 GaN 外延层的晶粒倾斜和扭转情况,从而提高 GaN 外延层的晶体质量. Lin 等<sup>[18]</sup>研究认为斜切衬底诱导外延层中产生了倾斜位错,倾斜位错和垂直位错之间相互作用形成位错环,进而降低了外延层的位错密度. Chuang 等<sup>[19]</sup>研究认为由于 GaN 外延层和斜切衬底之间微小的取向误差,从而降低了二者间的晶格失配,提高了外延层的晶体质量. Xu 等<sup>[20]</sup>提出斜切衬底促进了晶体生长的阶梯流模式,这种模式导致了宏观台阶的形成,并且减少了三维岛屿相互合并时产生的位错.目前研究人员对斜切衬底上的 GaN 生长过程、位错湮灭机制等研究还不充分.因此,本文系统地研究了在斜切蓝宝石衬底上金属有机化合物化学气相沉积 (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) 生长的 GaN 薄膜的材料特性,结合透射电子显微镜详细分析了斜切衬底上 GaN 的外延生长过程及位错传播过程,发现斜切衬底上特殊的位错终止现象,提出了斜切衬底降低外延层位错密度的合理解释.

## 2 材料生长及表征

研究的 GaN 薄膜样品是使用 Veeco Turbo-Disc K465i 型 MOCVD 设备外延生长而成.衬底使用斜切角度为 0°(即平面衬底), 1°, 3°, 5°的斜切蓝宝石衬底,其中衬底的斜切方向为 (0001) 面偏向于 (1 $\bar{1}$ 00) 面,所有衬底上均有一层 25 nm 的磁控溅射 AlN 成核层.在斜切 0°, 1°, 3°, 5°的蓝宝石衬底上生长的样品分别命名为样品 A, B, C, D.在 MOCVD 生长过程中,使用三甲基镓 (trimethyl gallium, TMGa) 和 NH<sub>3</sub> 作为 Ga 源和 N 源, N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 的混合气体作为载气,反应室压力设为 150 Torr (1 Torr = 133.02 Pa) 保持不变.四个样品采用相同工艺方法生长,具体生长方法如下:首先对衬底进行预处理,将温度升至 1100 °C,通入 190 L/min 的 H<sub>2</sub> 对衬底处理 10 min 以去除衬底表面残留的水汽、有机物等污染物.然后将反应室温度调节至 1080 °C,通入 600 mL/min (标准状况下) 的 TMGa 和 4.5×10<sup>4</sup> mL/min (标准状况下) 的 NH<sub>3</sub>,外延生长一层 5 μm 厚的 GaN 薄膜.

样品生长完成之后,使用 Bruker ICON 型原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 对样品的表面形貌进行表征,使用 Horiba Jobin Yvon LavRam HR800 型光致发光图谱测试仪 (photoluminescence spectroscopy, PL) 对样品的光学特性进行了分析,采用 Bruker D8Discover 型高分辨率 X 射线衍射仪 (high resolution X-ray diffraction, HRXRD) 研究了 GaN 薄膜的晶体质量,通过 Tecnai G2 F20 S-Twin 型透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 对样品的位错传播过程及降低机制进行了详细的分析,其中 TEM 样品采用常规机械减薄和氩 (Ar) 离子铣削工艺制备.

## 3 结果与讨论

### 3.1 样品测试结果分析

为了观察样品表面的形貌,使用 AFM 在轻敲模式下对样品进行了测试,其中,样品 A 进行了面积为 5 μm × 5 μm 的测试,样品 B, C, D 由于表面起伏较大,进行了面积为 50 μm × 50 μm 的测试,测试结果如图 1 所示.可以看出,样品 A 的

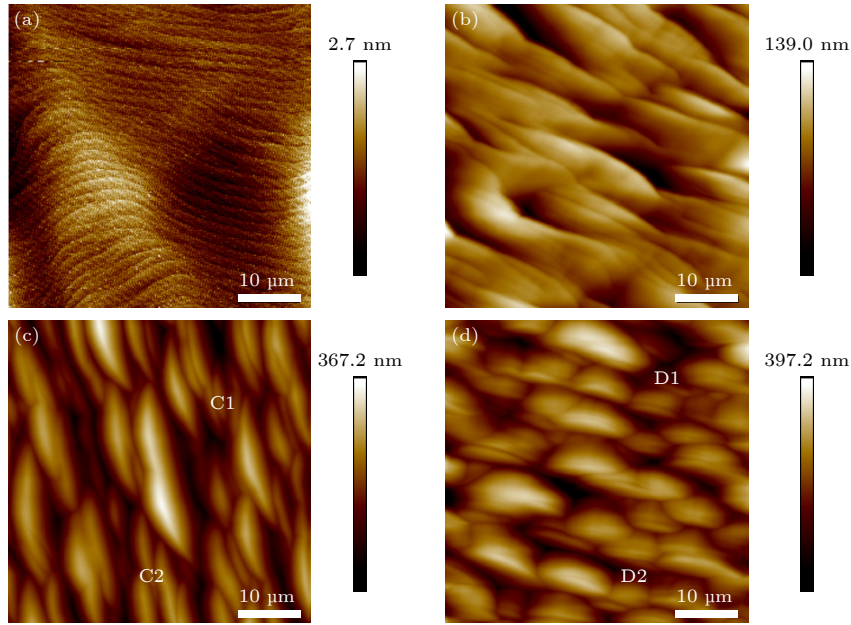


图 1 四个样品的 AFM 测试图 (a) 样品 A, RMS = 0.371 nm; (b) 样品 B, RMS = 18.3 nm; (c) 样品 C, RMS = 54.1 nm; (d) 样品 D, RMS = 56.9 nm

Fig. 1. AFM images of four samples: (a) Sample A, RMS = 0.371 nm; (b) sample B, RMS = 18.3 nm; (c) sample C, RMS = 54.1 nm; (d) sample D, RMS = 56.9 nm.

表面平整且整齐排布着一系列的台阶, 呈现出典型的台阶流生长模式, 并且样品 A 表面并未出现孔洞、位错坑、裂纹等其他缺陷, 而样品 B, C, D 的表面和样品 A 相比较粗糙, 表面呈现出宏观台阶状的起伏. 随着衬底斜切角度的增加, 样品表面起伏变大, 台阶高度明显增加. 并且在样品 C, D 表面观察到了类似锯齿状的台阶边缘. 通过 AFM 测试可以计算样品测试区域的均方根粗糙度 (root mean square roughness, RMS), RMS 可反映样品表面的起伏程度, 是评估样品表面形貌的重要指标. 样品 A 的 RMS 为 0.371 nm, 表面非常光滑. 而样品 B, C, D 的 RMS 分别为 18.3, 54.1 以及 56.9 nm, 随着衬底斜切角度变大, 样品表面变得越来越粗糙. AFM 测试结果说明斜切衬底会使样品的表面形貌产生退化, 衬底斜切角度越大, 样品表面越粗糙, 这也是斜切衬底上外延 GaN 的普遍现象<sup>[21-22]</sup>. 样品表面形貌退化与斜切衬底表面的原子台阶和 GaN 生长过程中的台阶合并有关. 如图 1(c) 中 C1, C2 和图 1(d) 中 D1, D2 处所示, 这些地方的台阶高度明显低于样品表面的最大台阶高度, 约为最大台阶高度的一半, 说明在 GaN 生长过程中存在台阶合并现象, 斜切衬底表面的原子台阶会发生台阶合并, 使得样品表面出现更大的宏观台阶. 关于样品表面锯齿状的台阶边缘, 这是由

于外延层表面的 Ga 原子台阶边缘与 N 原子台阶边缘均具有可供淀积原子结合的悬挂键, 且两种台阶边缘之间存在一定的夹角, 从而导致这种锯齿状台阶的出现, 这种现象在大角度斜切衬底上尤为明显<sup>[23]</sup>.

为了研究斜切衬底对 GaN 晶体质量的影响, 利用 HRXRD 对样品的晶体质量进行评估. 研究表明, X 射线摇摆曲线 (rocking curve, RC) 的半峰全宽 (full width at half maxima, FWHM) 可用来反映样品的位错密度, FWHM 越大, 样品位错密度越高. 其中, (002) 面的摇摆曲线可以反映样品中螺位错的密度, (102) 面的摇摆曲线可以反映样品中刃位错的密度, 总位错密度是螺位错密度和刃位错密度之和<sup>[24]</sup>. 位错密度  $\rho$  表示为

$$\rho = \frac{\beta^2}{9b^2}, \quad (1)$$

其中,  $\beta$  是摇摆曲线的半峰全宽;  $b$  是相应位错的伯格斯矢量, 螺位错和刃位错的伯格斯矢量分别为 0.519 nm 和 0.319 nm<sup>[25]</sup>. 图 2 分别是 4 个样品的 (002) 面摇摆曲线和 (102) 面摇摆曲线图. 表 1 总结了图 2 中曲线的 FWHM 值以及利用 (1) 式计算出的位错密度. 从表 1 得到, 斜切衬底可以显著降低样品的位错密度, 衬底斜切角度越大, 样品的位错密度越低. 位错密度最低的样品 D 和样

品 A 相比, 螺位错密度降低了 50.27%, 刃位错密度降低了 26.91%, 总位错密度降低了 31.70%, 可见斜切衬底对于 GaN 晶体质量的提升效果非常显著.

为了研究样品的光学特性, 在室温下 (300 K) 对样品进行了 PL 测试, PL 测试中使用的激发激光的波长为 325 nm, 测试结果如图 3(a) 所示, 图 3(b) 为波长范围 325—425 nm 的局部放大图. 测试结果表明, 4 个样品都具有明显的带边发射峰 (NBL), 均位于 363 nm 附近, 这是 GaN 的发射峰. 此外, 没有出现黄光带或其他明显的杂质发光峰, 表明样品中杂质含量较少 [26]. 4 个样品的 NBL 峰值有明

显的不同, 平面衬底样品即样品 A 的带边峰强度明显小于斜切衬底样品即样品 B, C, D, 并且衬底斜切角度越大, 带边峰强度越高, 样品 D 的带边峰强度接近样品 A 的两倍. 研究表明, PL 图谱中发光峰的强度与样品的位错密度有直接关系, 位错会充当非辐射复合中心, 降低载流子辐射复合效率, 从而降低发光峰的强度 [27]. 同时, 样品表面粗糙的形貌可以降低光子在晶体内部的全反射, 提高光提取效率 [28]. 由图 1 中 AFM 和图 2 中 HRXRD 测试结果可知, 随着衬底斜切角度的增大, 样品的位错密度降低, 表面 RMS 增加, 因此样品的 NBL 峰值呈上升趋势.

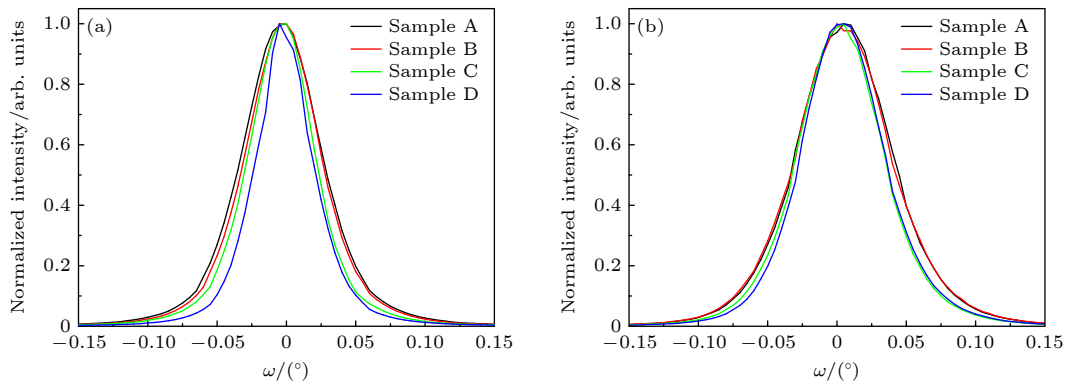


图 2 样品 A, B, C, D 的 (002) 面 (a) 和 (102) 面 (b) 的 XRD 摇摆曲线图

Fig. 2. XRD rocking curves of (002) (a) and (102) (b) of samples A, B, C and D.

表 1 样品 A, B, C, D 的 RC 曲线 FWHM 值和位错密度

Table 1. FWHM values and dislocation density of RC curves of samples A, B, C and D.

样品	(002)面 FWHM值/( $''$ )	(102)面 FWHM值/( $''$ )	螺位错 密度/( $10^7 \text{ cm}^{-2}$ )	刃位错 密度/( $10^8 \text{ cm}^{-2}$ )	总位错 密度/( $10^8 \text{ cm}^{-2}$ )
Sample A	235	282	11.0	4.20	5.30
Sample B	221	274	9.76	3.97	4.94
Sample C	196	251	7.69	3.33	4.11
Sample D	165	240	5.47	3.07	3.62

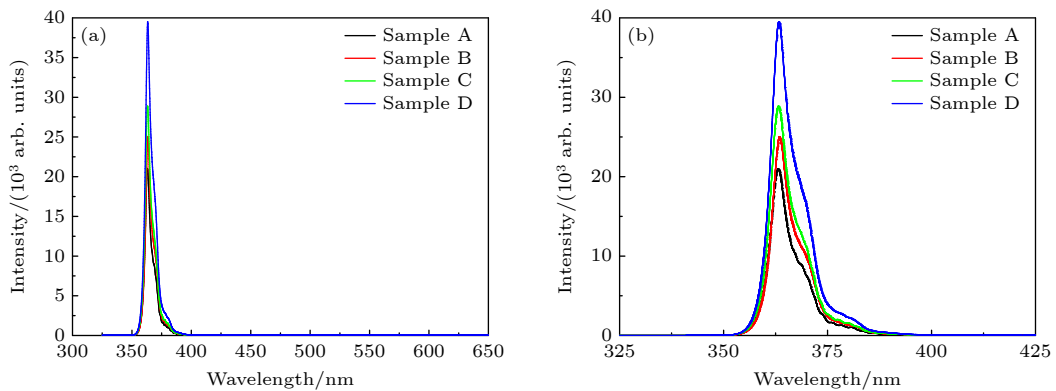


图 3 四个样品的室温下 PL 图 (a) 和局部放大图 (b)

Fig. 3. PL images (a) and local enlarged images (b) of four samples at room temperature.

### 3.2 斜切衬底上 GaN 生长模型及位错降低机制

为了研究斜切衬底对位错密度降低的机制, 对位错密度最低的样品即样品 D 进行了截面 TEM 测试, 结果如图 4 所示. 根据 TEM 测试原理中位错的消像准则, 在  $g = [0002]$  的条件下仅显示具有螺位错分量的位错, 在  $g = [11\bar{2}0]$  的条件下仅显示具有刃位错分量的位错, 混合位错在两种矢量方向上都会出现<sup>[29]</sup>. 从 TEM 测试结果可知, 大部分位错并没有向上延伸到样品表面, 在样品内部就已经终止. 位错密度降低主要包括两种方式: 一个是在 GaN 层和衬底的界面处, 位错弯曲相互形成位错环湮灭, 没有继续向上延伸, 这个是 GaN 生长过程中的普遍现象, 和成核岛的生长合并相关<sup>[30]</sup>; 另一个是在 GaN 外延层的内部, 有部分位错在向上延伸的过程中突然终止, 进而降低了样品表面区域的位错密度, 并且位错终止的高度并不一致, 如图 4 中红色圆圈区域所示. 这种位错终止现象是斜切衬底上特有的现象, 是斜切衬底降低位错密度的主要原因之一.

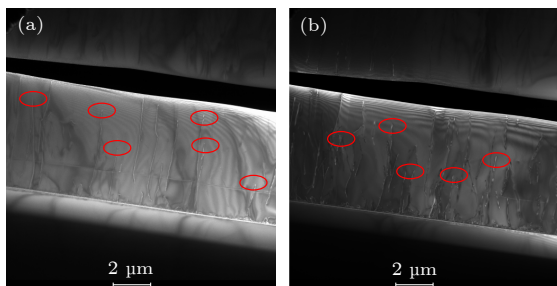


图 4 样品 D 的 TEM 测试图 (a)  $g = [0002]$ ; (b)  $g = [11\bar{2}0]$

Fig. 4. TEM images of sample D: (a)  $g = [0002]$ ; (b)  $g = [11\bar{2}0]$ .

而关于斜切衬底上 GaN 薄膜中的位错终止现象, 目前缺乏相关的研究. 在这里提出一个斜切衬底上 GaN 的生长模型来解释这一现象, 如图 5 所示. 一般情况下, 斜切衬底表面规则排列着原子高度的台阶. 在 GaN 生长初期, 相邻的原子台阶之间会发生台阶合并成一个微台阶, 并且在后续的生长过程中台阶会继续发生合并, 最终在样品表面形成宏观台阶, 导致样品表面平整度下降, RMS 相应变大, 这与图 1 中 AFM 测试结果一致. 在之后的 GaN 生长过程中, 由于衬底的台阶相较于之前的原子台阶高度有很大增加, 所以在台阶表面会同时

发生 GaN 的纵向生长和横向生长, 其中横向生长的区域位错密度很低. 当高台阶上的 GaN 与低台阶上的 GaN 发生合并时, 其中低台阶中部分位错由于受到高台阶横向生长 GaN 的阻挡而终止, 不能继续向上延伸, 从而降低了样品的位错密度. 从图 5 可以看出, 位错会在不同的高度被阻挡, 这与图 4 中 TEM 测试结果相符. 衬底斜切角度对样品晶体质量的影响也可以用这个模型进行解释. 由于衬底微台阶高度的增加, 在微台阶表面生长的 GaN 就有了更大的纵向和横向生长空间, 从而 GaN 横向生长长度增加, 相邻台阶合并时, 高台阶横向生长的 GaN 可以阻挡更多的位错, 因此大角度斜切衬底的样品其位错密度更低, 这与图 2 中 HRXRD 测试结果一致.

而在平面衬底上生长 GaN 薄膜时 (样品 A), 蓝宝石衬底上的 GaN 成核层会先以 3D 岛模式生长, 如图 6(a) 所示. 当外延层继续生长时, 3D 岛的横向生长速率提高, 使得相邻成核岛开始合并, 从而转向 2D 平面生长, 在这个过程中一部分位错会形成位错环湮灭从而降低了位错密度, 但是剩余位错在后续的生长过程中很难终止, 平面衬底上生长的 GaN 薄膜位错密度依然很高<sup>[30]</sup>, 如图 6(b) 所示. 所以, 平面衬底只有通过预处理才可以显著降低位错密度<sup>[31]</sup>.

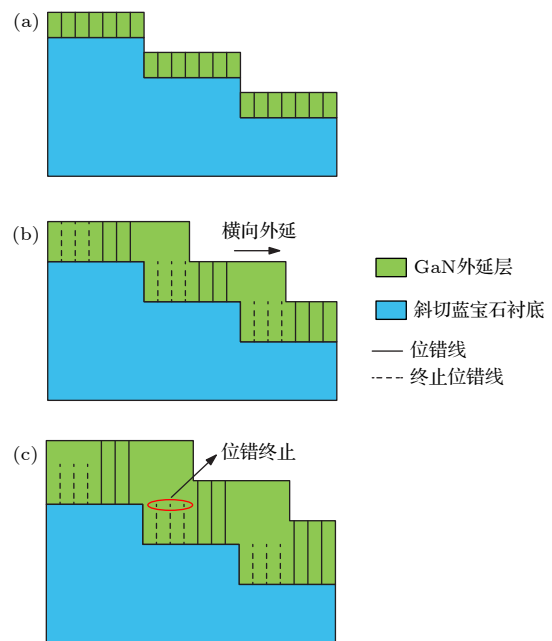


图 5 斜切衬底上 GaN 的生长过程及位错传播过程

Fig. 5. Growth process and dislocation spread of GaN on vicinal substrates.

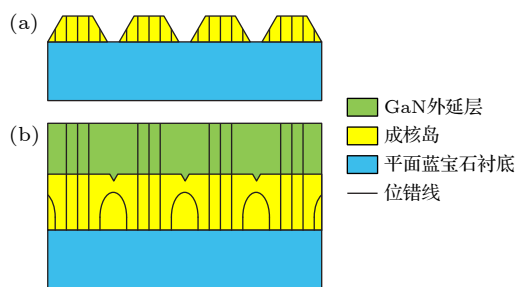


图6 平面衬底上 GaN 的生长过程及位错传播过程

Fig. 6. Growth process and dislocation spread of GaN on planar substrates.

## 4 结论

本文采用 MOCVD 技术在不同角度的斜切蓝宝石衬底上生长了 GaN 薄膜。AFM 测试结果表明：斜切衬底使得 GaN 薄膜的表面形貌发生退化，样品表面出现了宏观台阶，衬底斜切角度越大，样品表面越粗糙。XRD 测试结果表明：斜切衬底大幅降低了 GaN 薄膜的位错密度，衬底斜切角度越大，位错密度越低，衬底斜切  $5^\circ$  的样品位错密度低至  $3.62 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。通过 TEM 测试发现斜切衬底样品中特殊的位错终止现象，这是位错密度降低的主要原因之一。为此，提出了一个斜切衬底上 GaN 的生长模型来解释这些现象。斜切衬底上 GaN 生长初期的台阶合并导致样品表面粗糙度增加，台阶合并后的微台阶高度差诱导 GaN 产生横向生长，高台阶的 GaN 层会对低台阶 GaN 层中的位错有一个阻挡作用，导致位错传播终止，位错密度降低。不同角度的斜切衬底的表面台阶不一致，从而对样品的位错密度有不同的影响。总之，本文针对斜切衬底对 GaN 外延层位错密度的影响进行了详细的研究，提出了斜切衬底降低位错密度的一种全新机制，对于高质量 GaN 材料制备提供了新的理论依据。

## 参考文献

[1] Morkoc H, Strite S, Gao G B, Lin M E, Sverdlov B, Burns M 1994 *J. Appl. Phys.* **76** 1363  
 [2] Kneissl M, Seong T Y, Han J, Amano H 2019 *Nat. Photonics* **13** 233  
 [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] 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]

[5] Li G Q, Wang W L, Yang W J, Lin Y H, Wang H Y, Lin Z T, Zhou S Z 2016 *Rep. Prog. Phys.* **79** 056501  
 [6] Jena D, Mishra U K 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 64  
 [7] Liu C, Li M, Wen Z, Gu Z Y, Yang M C, Liu W H, Han C Y, Zhang Y, Geng L, Hao Y 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 057301 (in Chinese) [刘成, 李明, 文章, 顾钊源, 杨明超, 刘卫华, 韩传余, 张勇, 耿莉, 郝跃 2022 物理学报 **71** 057301]  
 [8] Zhou S J, Zhao X Y, Du P, Zhang Z Q, Liu X, Liu S, Guo A 2022 *Nanoscale* **14** 4887  
 [9] Kung P, Walker D, Hamilton N, Diaz J, Razeghi M 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 570  
 [10] Zhao Y, Xu S R, Feng L S, Peng R S, Fan X M, Du J J, Su H K, Zhang J C, Hao Y 2022 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **143** 106535  
 [11] Ni Y Q, He Z Y, Zhou D Q, Yao Y, Yang F, Zhou G L, Shen Z, Zhong J, Zhen Y, Zhang B J, Liu Y 2015 *Superlattices Microstruct.* **83** 811  
 [12] Fatemi M, Wickenden A E, Koleske D D, Twigg M E, Freitas J A, Henry R L, Gorman R J 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 608  
 [13] Shen X Q, Shimizu M, Okumura H 2003 *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** L1293  
 [14] Chang P C, Yu C L 2008 *J. Electrochem. Soc.* **155** H369  
 [15] Zhang H C, Sun Y, Song K, et al. 2022 *Appl. Phys. Lett.* **119** 072104  
 [16] Fan X M, Bai J C, Xu S R, Zhang J C, Li P X, Peng R S, Zhao Y, Du J J, Shi X F, Hao Y 2018 *Thin Solid Films* **663** 44  
 [17] Shen X Q, Matsuhata H, Okumura H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 021912  
 [18] Lin Z Y, Zhang J C, Xu S R, Lü L, Liu Z Y, Ma J C, Xue X Y, Xue J S, Hao Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 186103 (in Chinese) [林志宇, 张进成, 许晟瑞, 吕玲, 刘子扬, 马俊彩, 薛晓咏, 薛军帅, 郝跃 2012 物理学报 **61** 186103]  
 [19] Chuang R W, Yu C L, Chang S J, Chang P C, Lin J C, Kuan T M 2007 *J. Cryst. Growth* **308** 252  
 [20] Xu Z H, Zhang J C, Zhang Z F, Zhu Q W, Duan H T, Hao Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5457  
 [21] Sun H D, Mitra S, Subedi R C, et al. 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1905445  
 [22] Zhang H C, Sun Y, Song K, Xing C, Yang L, Wang D H, Yu H B, Xiang X Q, Gao N, Xu G W, Sun H D, Long S B 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 072104  
 [23] Shen X Q, Furuta K, Nakamura N, Matsuhata H, Shimizu M, Okumura H 2007 *J. Cryst. Growth* **301** 404  
 [24] Chierchia R, Bottecher T, Heinke H, Einfeldt S, Figge S, Hommel D 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 8918  
 [25] Hao Y, Zhang J F, Zhang J C 2013 *Nitride Wide Bandgap Semiconductor Materials and Electronic Devices* (Beijing: Science Press) p25 (in Chinese) [郝跃, 张金凤, 张进成 2013 氮化物宽禁带半导体材料与电子器件 (北京: 科学出版社) 第 25 页]  
 [26] Xu S R, Hao Y, Zhang J C, Jiang T, Yang L A, Lu X L, Lin Z Y 2013 *Nano Lett.* **13** 3654  
 [27] Yu H B, Chen H, Li D S, Wang J, Xing Z G, Zheng X H, Huang Q, Zhou J M 2004 *J. Cryst. Growth* **266** 455  
 [28] Lee J H, Lee D Y, Oh B W, Lee J H 2010 *IEEE Trans. Electron Devices* **57** 157  
 [29] Kong B H, Sun Q, Han J, Lee I H, Cho H K 2012 *Appl. Surf. Sci.* **258** 2522  
 [30] Pakula K, Baranowski J M, Borysiuk J 2007 *Cryst. Res. Technol.* **42** 1176  
 [31] 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

# Dislocation reduction mechanism of GaN films on vicinal sapphire substrates\*

Xu Shuang   Xu Sheng-Rui<sup>†</sup>   Wang Xin-Hao   Lu Hao   Liu Xu  
Yun Bo-Xiang   Zhang Ya-Chao   Zhang Tao   Zhang Jin-Cheng   Hao Yue

(Key Laboratory of the Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, National Engineering Research Center of Wide Band-gap Semiconductor, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

( Received 16 May 2023; revised manuscript received 28 July 2023 )

## Abstract

GaN materials are widely used in optoelectronic devices, high-power devices and high-frequency microwave devices because of their excellent characteristics, such as wide frequency band, high breakdown electric field, high thermal conductivity, and direct band gap. Owing to the large lattice mismatch and thermal mismatch brought by the heterogeneous epitaxy of GaN material, the GaN epitaxial layer will produce a great many dislocations in the growth process, resulting in the poor crystal quality of GaN material and the difficulty in further improving the device performance. Therefore, researchers have proposed the use of vicinal substrate to reduce the dislocation density of GaN material, but the dislocation annihilation mechanism in GaN film on vicinal substrate has not been sufficiently studied. Therefore, in this paper, GaN thin films are grown on vicinal sapphire substrates at different angles by using metal organic chemical vapor deposition technique. Atomic force microscope, high resolution X-ray diffractometer, photoluminescence testing, and transmission electron microscopy are used to analyze in detail the effects of vicinal substrates on GaN materials. The use of vicinal substrates can significantly reduce the dislocation density of GaN materials, but lead to degradation of their surface morphology morphologies. And the larger the substrate vicinal angle, the lower the dislocation density of the sample is. The dislocation density of the sample with a 5° bevel cut on the substrate is reduced by about one-third compared to that of the sample with a flat substrate. The special dislocation termination on the mitered substrate is observed by transmission electron microscopy, which is one of the main reasons for the reducing the dislocation density on the mitered substrate. The step merging on the vicinal sapphire substrate surface leads to both transverse growth and longitudinal growth of GaN in the growth process. The transverse growth region blocks the dislocations, resulting in an abrupt interruption of the dislocations during propagation, which in turn reduces the dislocation density.

Based on the above phenomena, a model of GaN growth on vicinal substrate is proposed to explain the reason why the quality of GaN crystal can be improved by vicinal substrate.

**Keywords:** vicinal sapphire substrates, GaN, dislocation termination, transmission electron microscope

**PACS:** 61.72.uj, 61.72.Ff, 68.37.Lp, 81.15.Kk

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230793

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFB3604400), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62074120, 62134006), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. JB211108).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [srxu@xidian.edu.cn](mailto:srxu@xidian.edu.cn)



## 斜切蓝宝石衬底上GaN薄膜的位错降低机制

徐爽 许晟瑞 王心颢 卢灏 刘旭 贡博祥 张雅超 张涛 张进成 郝跃

## Dislocation reduction mechanism of GaN films on vicinal sapphire substrates

Xu Shuang Xu Sheng-Rui Wang Xin-Hao Lu Hao Liu Xu Yun Bo-Xiang Zhang Ya-Chao Zhang Tao Zhang Jin-Cheng Hao Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 196101 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230793

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230793>

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

原位液相透射电子显微镜及其在纳米粒子表征方面的应用

*In-situ* liquid phase transmission electron microscope and its application in nanoparticle characterization

物理学报. 2021, 70(8): 086701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201899>

扫描电子显微镜法测定金属衬底上石墨烯薄膜的覆盖度

Coverage measurement of graphene film on metallic substrate using scanning electron microscopy

物理学报. 2018, 67(7): 076802 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172654>

基于扫描电子显微镜的碳纳米管拾取操作方法研究

Method of picking up carbon nanotubes inside scanning electron microscope

物理学报. 2018, 67(13): 136801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180347>

基于GaN同质衬底的高迁移率AlGaIn/GaN HEMT材料

Highmobility AlGaIn/GaN high electronic mobility transistors on GaN homo-substrates

物理学报. 2018, 67(7): 076801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172581>

镁中位错和非晶作用机制的分子动力学模拟

Molecular dynamics simulation of mechanism of interaction between dislocation and amorphism in magnesium

物理学报. 2022, 71(14): 143101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212318>

Ni/Au/n-GaN肖特基二极管可导位错的电学模型

Physical model of conductive dislocations in GaN Schottky diodes

物理学报. 2018, 67(17): 177202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180762>