论文

圆锥形图形化蓝宝石衬底对 MOCVD 生长 GaN 外延膜的位错密度和应力应变影响

王焕友^{①②*}, 李亚兰^{①③}, 谢光奇^①, 李明君^②^① 湘南学院物理与电子信息工程系, 郴州 423000;^② 中南大学物理与电子学院, 长沙 410083;^③ 华中师范大学物理科学与技术学院, 武汉 430079

*联系人, E-mail: whycs@163.com

收稿日期: 2013-02-24; 接受日期: 2013-05-30

湖南省教育厅科研基金(编号: 10C1235)和湖南省自然科学基金(编号: 13JJ3121)资助项目

摘要 通过金属氧化物化学气相沉积(MOCVD)方法在 $2.5\ \mu\text{m}\times 1.6\ \mu\text{m}\times 0.5\ \mu\text{m}$ 圆锥形图形化蓝宝石衬底(CPSS)和没有图形化平面蓝宝石衬底(USS)上生长 GaN 外延膜. 高分辨率 X 射线衍射仪(HR-XRD)测试结果表明, 生长在 CPSS 上 GaN 的刃位错的密度比生长在 USS 上 GaN 的刃位错密度低得多; 从透射电子显微镜(TEM)观察, CPSS 可有效地减小 GaN 外延膜中的线位错密度; 拉曼散射谱显示通过 CPSS 可有效地减小 GaN 外延膜中的残余应力; 比较两种外延膜中的光致发光谱(PL), 能从生长在 CPSS 上 GaN 外延膜中观察到强而尖的带边发射. 以上结果表明: 生长在 CPSS 上 GaN 外延膜的质量高于生长在 USS 上 GaN 外延膜的质量.

关键词 圆锥形图形化蓝宝石衬底, 氮化镓, 线位错, 应力应变

PACS: 81.05.Ea, 81.15.Gh, 78.66.Fd, 61.72.Ff

doi: 10.1360/132013-87

1 引言

作为第三代半导体材料的代表, 氮化镓基半导体材料是新兴半导体光电产业的核心材料和基础器件, 如发光二极管、激光二极管、全彩色显示、高频高温电子器件等方面都有广泛的应用^[1–4]. 由于 GaN 和蓝宝石衬底之间有较大的晶格失配(16%)和热膨胀系数失配(34%), 导致在 GaN 外延层中产生 $10^8\text{--}10^{10}$

cm^{-2} 线位错密度, 高的位错密度将影响外延薄膜的光学和电学性能, 容易造成载流子泄露和非辐射中心增多, 使得器件的内量子效率下降; 另一方面 GaN 的折射率($n=2.5$)高于蓝宝石衬底的折射率($n=1.78$)和空气的折射率($n=1$), 因此光逃逸角锥的临界角($\sim 23^\circ$)非常小, 造成有源层产生的光子只有 $\sim 4\%$ 从表面溢出, 降低器件的光提取效率. 近年来, 采用横向外延过生

引用格式: 王焕友, 李亚兰, 谢光奇, 等. 圆锥形图形化蓝宝石衬底对 MOCVD 生长 GaN 外延膜的位错密度和应力应变影响. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1519–1524
Wang H Y, Li Y L, Xie G Q, et al. Influence of cone-shaped pattern sapphire substrates on dislocation density and stress-strain of GaN epilayers by MOCVD (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1519–1524, doi: 10.1360/132013-87

长(ELOG)^[5-8]和悬臂外延生长(PE)^[9,10]等诸多方法来改善 GaN 外延薄膜的性能, 尽管 ELOG 被认为是一种极为有效的减小线位错密度的方法, 但这种方法耗工耗时, 且要求两步生长, 这常会引入非故意掺杂或污染. 最近采用单步生长的图形化衬底技术成为研究的热点, 图形化衬底技术通过在蓝宝石表面制作具有细微结构的图形, 然后在这种图形化衬底表面进行材料外延. 图形化衬底改变了 GaN 材料的生长过程, 一方面, 它能够通过降低外延层应力, 改善晶体生长性能; 另一方面, 还能提高 LED 出射光的接触面逸出角, 从而提高出光效率.

随着图形衬底思路的提出, 许多的研究小组就不同的图形(如锥形(Pyramidal)^[11]、半球形(Hemispherical)^[12]、凸形(Convex)^[13]、圆锥形(Cone)^[14]、透镜形(Lens)^[15]、长条形(Stripe)^[16]), 不同规格的图形衬底上经由不同的生长模式外延 GaN 薄膜材料, 研究它们的位错结构、应力分布、以及它们对外延层光学性质的影响, 本文采用 MOCVD 方法, 在 $2.5\ \mu\text{m} \times 1.6\ \mu\text{m} \times 0.5\ \mu\text{m}$ 的 CPSS 和 USS 上生长 GaN 薄膜材料, 利用 HRXRD、TEM、扫描电子显微镜(SEM)、PL 系统地研究了 GaN 薄膜的位错密度和分布, 应力的变化, 目的是为了说明由 CPSS 引起的侧向外延过生长是怎样减小刃位错, 相对于在 USS 上生长 GaN 薄膜材料内位错减小和应变弛豫的程度, 以及 CPSS 是怎样影响外延膜的光致发光性质.

2 实验条件和方法

本实验中将光刻胶旋涂在(0001)面蓝宝石上, 采用 BCl_3 和 Cl_2 刻蚀气体, 电感耦合等离子体(ICP)技术对蓝宝石衬底进行刻蚀, 获得圆锥形图形化蓝宝石衬底, 刻蚀后的图形圆锥高度为 $1.6\ \mu\text{m}$, 圆锥的直径

为 $2.5\ \mu\text{m}$, 锥体之间的距离为 $0.5\ \mu\text{m}$, 图 1 为倾斜 0° 和 40° 的 CPSS 的 SEM 图. 在外延生长以前, 对 CPSS 和 USS 进行有机清洗, 并用 HF 进行表面处理. 采用 Veeco 厂家生产的 MOCVD 设备在 CPSS 和 USS 上使用相同的工艺生长全结构的 GaN 外延层. 生长过程中采用 H_2 和 N_2 作为载气, Ga 源和 N 源分别为三甲基镓(TMGa)和 (NH_3) . 生长过程如下: 将 UPSS 和 USS 在 1200°C 下热处理 10 min, 降温至 550°C 进行氮化处理并生长 30 nm 低温 GaN 缓冲层, 然后在 1120°C 生长约 $3\ \mu\text{m}$ 非掺杂的 GaN 层, 生长中 V/III 比为 1450.

本文分别使用 HRXRD, SEM, TEM, PL, Raman 散射仪完成了对 CPSS 和 USS 上生长的 GaN 薄膜样品的各种检测和分析, 使用的 XRD 设备是 Philips X'pert MRD (Materials Research Diffractometer)系统, 光致发光谱(PL)仪使用的是激发光源为 325 nm 的 He-Cd 紫外激光器, SEM 型号是 JSM-6100, 拉曼散射采用的是 RAMANOR-U1000 拉曼光谱仪, 激光线为 Ar^+ 激光器 514.5 nm 的谱线.

3 结果及讨论

利用 HRXRD 分别对生长在 CPSS 和 USS 上 GaN 薄膜样品进行了对称(0002)面和斜对称($10\bar{1}2$)面的 ω 扫描. 生长在 CPSS 和 USS 上的 GaN 薄膜样品的对称(0002)面衍射半峰宽分别为 222 arcsec 和 292 arcsec, 斜对称($10\bar{1}2$)面衍射半峰宽分别为 232 arcsec 和 385 arcsec. 一般来说, HRXRD 斜对称($10\bar{1}2$)面衍射曲线半峰宽与晶格形变引起的线性位错相联系, 这些位错包括刃位错、螺位错和混合位错; 而对称(0002)面衍射半峰宽与螺位错和混合螺-刃位错相联系. 将斜对称($10\bar{1}2$)面衍射半峰宽与对称(0002)面半峰宽比

图 1 (a) CPSS 的 SEM 正视图, (b) 倾斜 40° 的 CPSS SEM 图
Figure 1 SEM images of CPSS (a) from plan-view, (b) from slant 40° -view.

较, 说明生长在 CPSS 和 USS 上 GaN 薄膜样品中的位错主要是刃位错. 基于下面的公式^[17]我们定量估算螺位错和刃位错的密度

$$D_s = \frac{\beta_s^2}{4.35 \times |b_s|^2} = \frac{\beta_{002}^2}{4.35 \times (b_s \cos \alpha)^2}, \quad (1)$$

$$D_E = \frac{\beta_e^2}{4.35 \times |b_e|^2} = \frac{\beta_{102}^2 - \beta_{002}^2}{4.35 \times (b_e \sin \alpha)^2}. \quad (2)$$

这里 $|b_s|$ 和 $|b_e|$ 是螺型位错 ($|b_s|=0.5185$ nm) 和刃型位错 ($|b_e|=0.3189$ nm) 的伯格矢量的大小, β_{002} 和 β_{102} 是 XRD(0002) 和 $(10\bar{1}2)$ 的半峰宽, α 是倒格子矢量 (K_{hkl}) 和 (0001) 面法线之间的夹角, 通过计算得出生长在 CPSS 上的 GaN 样品的刃位错和螺位错密度分别为 $0.51 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 和 $1.85 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$; 而生长在 USS 上 GaN 样品的刃位错和螺位错密度分别为 $7.15 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 和 $3.21 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$. 生长在 CPSS 上 GaN 的刃型位错比 USS 上生长的 GaN 的位错密度低得多, 而螺位错变化不大, 即螺位错密度不如刃位错密度变化剧烈, 说明采用 CPSS 后主要降低了刃型位错密度. 为了研究生长在 CPSS 上 GaN 刃型位错密度降低的原因, 我们对生长在 CPSS 上 GaN 样品的进行了透射电子显微镜 (TEM) 观察, 图 2 为生长在 CPSS 上的 GaN 薄膜的 TEM 剖面图. 从图上可以看出, 蓝宝石图形上方 GaN 外延层刃型位错弯曲 90° , 没有延伸到表面, 这主要是由于 GaN 和蓝宝石衬底之间有较大的晶格失配, 刃型位错容易在 c 面蓝宝石平面上生成, 当采用图形化衬底后, 开始阶段由于非图形衬底区域的 GaN 生长速率高于圆锥形图形衬底区域, 当生长到圆锥区域的顶部, 横向外延过生长 GaN 相互联结和覆盖整个圆锥区域, 限制了位错的继续向上延伸, 这便大大降低了 GaN 外延膜表面的刃型位错密度.

为了研究和分析生长在 CPSS 和 USS 上的 GaN 薄膜的残余应力应变, 我们首先测定了两薄膜样品 (0004) 面的衍射角, 测定过程中在每个样品上取上、下、左、右、中五个不同的点测定其衍射峰, 取其平均值, 得出它们的晶格常数分别为 $5.1931 \text{ \AA}$ 和 $5.2022 \text{ \AA}$. 与体材料 GaN 的晶格常数 $5.185 \text{ \AA}$ ^[18] 比较, 说明经由 MOCVD 方法在蓝宝石衬底上生长的 GaN 薄膜具有压应变, 这是由于衬底与外延层之间的晶格失配和冷却过程中热膨胀系数失配引起的, 将两个样品的晶格常数与体材料 $5.185 \text{ \AA}$ ^[18] 比较, CPSS 上生长的 GaN 薄膜与体材料 GaN 样品有比较好的一致性,

图 2 生长在 CPSS 上 GaN 薄膜的 TEM 剖面图
Figure 2 Cross-section TEM image of GaN epilayer grown on CPSS.

说明经由 CPSS 容易使靠近 GaN 薄膜界面处的压应变弛豫, 这是由于 c 面尺寸减小, 因为圆锥形图形区域上没有 (0001) 面. 紧接着, 我们分别测定了 (0002), $(10\bar{1}2)$, $(20\bar{2}4)$ 面衍射峰的位置, 结果见表 1. 根据下面的公式计算了面内应变 e'' 和面外应变 $e^\perp$,

$$d_{0001} = \frac{2\lambda}{2\sin(\theta_{0002} + \Delta\theta_1)} = \frac{4\lambda}{2\sin(\theta_{0004} + \Delta\theta_1)}, \quad (3)$$

$$d_{10\bar{1}2} = \frac{\lambda}{2\sin(\theta_{10\bar{1}2} + \Delta\theta_2)} = \frac{2\lambda}{2\sin(\theta_{20\bar{2}4} + \Delta\theta_2)}, \quad (4)$$

$$c = d_{0001}, \quad (5)$$

$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{4\left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2}\right)\frac{l^2}{c^2}}}, \quad (6)$$

$$e^\perp = (c - c_0)/c_0, \quad (7)$$

$$e'' = (a - a_0)/a_0. \quad (8)$$

这里 d_{0001} 和 $d_{10\bar{1}2}$ 分别是 (0001) 面和 $(10\bar{1}2)$ 面的面间距, θ_{0002} , θ_{0004} , $\theta_{10\bar{1}2}$, $\theta_{20\bar{2}4}$ 分别是 (0002), (0004), $(10\bar{1}2)$, $(20\bar{2}4)$ 衍射峰的位置; $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 为系统误差; a 和 c 是应变晶格参数; a_0 和 c_0 是未应变的晶格参数, 即 $3.189 \text{ \AA}$ 和 $5.185 \text{ \AA}$ ^[18]. 比较生长在 CPSS 和 USS 上 GaN 薄膜样品的 $e^\perp$ 和 e'' , 说明经由 CPSS 可使面内和面外的应力得到弛豫, 降低其应变, 从而改善了晶体的质量.

由于拉曼散射能提供薄膜内振动态的信息, 而振动态的声子频率对应变和微观无序十分敏感, 因而可根据振动峰的形状和选择定则^[19]判定薄膜的生

表 1 生长在 CPSS 和 USS 上 GaN 薄膜的衍射峰位置和应变
Table 1 Diffraction peak locations and strain of samples on CPSS and USS

	(0002)(°)	(0004)(°)	(10 $\bar{1}2$)(°)	(20 $\bar{2}4$)(°)	$e^{\perp}$ (%)	$e^{\parallel}$ (%)
CPSS 上薄膜样品	17.0023	36.1628	24.0248	54.6022	0.1619	0.0824
USS 上薄膜样品	17.4227	36.4228	24.0658	54.6335	0.3214	0.5222

长质量. 由于外延 GaN 层是六角纤锌矿结构, 满足 C_{6v} 对称, 总共存在六种拉曼激活膜: 两个 E_2 (高频和低频支), $E_1(TO)$, $E_1(LO)$, $A_1(LO)$ 和 $A_1(TO)$. 根据选择定则, 我们采用入射光平行于 c 轴的背散射条件进行拉曼测试, 只允许出现 $A_1(LO)$ 和 E_2 模. 图 3 为 CPSS 衬底和 USS 衬底上生长的 GaN 薄膜的的室温 Raman 散射谱, 图中对 Raman 谱和参数进行了 Lorentzian 线性拟合. 对 CPSS 衬底上生长的样品, E_2^{high} 和 $A_1(LO)$ 分别为 570.2 cm^{-1} 和 736.8 cm^{-1} ; 对生长在 USS 衬底上的样品, E_2^{high} 和 $A_1(LO)$ 分别为 571.1 cm^{-1} 和 738.0 cm^{-1} , 与无应力状态的模式^[20,21]比较, 两样品的 E_2^{high} 和 $A_1(LO)$ 均向高能方向移动, 说明通过 MOCVD 方法在蓝宝石衬底上生长的 GaN 外延膜处于压应力状态. 由于 GaN 的 E_2^{high} 和 $A_1(LO)$ 对膜内应力非常敏感, 尤其是 E_2^{high} , 随着膜内的压应力增加会向大波数方向移动, 当膜内有张应力存在时, 会向相反方向移动.

图 3 CPSS 衬底和 USS 衬底上生长的 GaN 薄膜的 Raman 散射谱

Figure 3 Raman spectra of the GaN grown on CPSS and USS.

比较在 CPSS 和 USS 衬底上生长的 GaN 样品的 E_2^{high} 和 $A_1(LO)$ 模, 说明通过 CPSS 可降低 GaN 外延膜内的压应力. 生长在 CPSS 衬底上 GaN 薄膜的 E_2^{high} 半峰宽是 4.13 cm^{-1} , 低于生长在 USS 衬底上 GaN 样品得半峰宽 10.82 cm^{-1} , 并且生长在 CPSS 衬底上 GaN 样品的 Raman 强度约是生长在 USS 衬底上 GaN 样品的 2 倍, 这些都表明生长在 CPSS 衬底上 GaN 薄膜的结晶质量高于生长在 USS 衬底上 GaN 薄膜.

图 4 生长在 CPSS 和 USS 上薄膜样品的室温光致发光谱(PL)

Figure 4 Room temperature PL spectra for samples on CPSS and USS.

图 4 为生长在 CPSS 和 USS 上薄膜样品的室温光致发光谱(PL), 它们对应的峰值波长分别为 364.8 nm 和 361.6 nm, 即在 CPSS 上生长的 GaN 薄膜的 PL 谱峰值波长相对于 USS 上生长的 GaN 薄膜的 PL 谱峰值波长产生 3.2 nm 的红移, 这被认为是 CPSS 上生长的 GaN 薄膜压应变弛豫的直接证据, 这也与用 XRD 分析的两样品的应力结构相一致. 因为 GaN 外延层的带隙能与膜内的残余应力有关, 张应力导致带隙减小, 而压应力导致带隙增加^[22,23], 因此 CPSS 上生长 GaN 薄膜内压应力小于 USS 上生长的 GaN 薄膜内的压应力. 样品 USS 的 PL 谱上有一个小的与缺陷有关的黄光峰(见图 4 插图), 这都说明了 CPSS 上生长 GaN 薄膜晶体质量得到改善, 位错密度减小. 另外生长在 CPSS 上 GaN 薄膜的 PL 谱强度较大, 说明 CPSS 倾斜的侧壁改变了光线的入射角, 使得

原本全反射的光线得以出射, 从而提高了出光效率.

4 结论

总的来说, 通过 MOCVD 方法在圆锥形图形化蓝宝石衬底上生长的晶体质量高于普通平面蓝宝石衬底上生长的 GaN, 通过 CPSS 可降低 GaN 外延膜的位错密度, 这是由于 GaN 的横向生长速度大于纵向生长速度, 使得蓝宝石图形上方 GaN 外延层线位错弯曲, 不能延伸到表面. 经由 CPSS 可使 GaN 外延膜的应力得到弛豫, 降低其应变, 从而改善晶体质量. 根据膜内应力与能带隙之间的关系, 通过 PL 谱判定通过 CPSS 可降低 GaN 膜内的压应力; 另根据两样品 PL 谱强度的差别, 说明 CPSS 倾斜的侧壁改变了光线的入射角, 使得原本全反射的光线得以射出, 提高了出光效率.

致谢 感谢湘能华磊光电股份有限公司的大力支持, 感谢湘能华磊光电股份有限公司戚运东博士、苗振林博士的有益探讨.

参考文献

- 1 Narukawa Y, Niki I, Izuno K, et al. Phosphor-conversion white light emitting diode using InGaN near-ultraviolet chip. *Jpn J Appl Phys*, 2002, 41: L371–L373
- 2 Han J, Crawford M H, Shul R J, et al. AlGaIn/GaN quantum well ultraviolet light emitting diodes. *Appl Phys Lett*, 1998, 73: 1688–1690
- 3 Morita D, Sano M, Yamamoto M, et al. High output power 365 nm ultraviolet light emitting diode of GaN-free structure. *Jpn J Appl Phys*, 2002, 41: L1434–L1436
- 4 Wu D S, Hsu S C, Huang S H, et al. GaN/Mirror/Si light-emitting diodes for vertical current injection by laser lift-off and wafer bonding techniques. *Jpn J Appl Phys*, 2004, 43: 5239–5242
- 5 Hsu H C, Su Y K, Huang S J, et al. Effects of trimethylgallium flow rate on a-plane GaN growth on r-plane sapphire during one-sidewall-seeded epitaxial lateral overgrowth. *Appl Phys Express*, 2011, 4(3): 035501–035503
- 6 Hong K E, Chan K K, Ho K D, et al. InGaIn/GaN white light-emitting diodes embedded with europium silicate thin film phosphor. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, 46(9): 1381–1387
- 7 Huang C Y, Ku H M, Liao C Z, et al. MQWs InGaIn/GaN LED with embedded micro-mirror array in the epitaxial lateral-overgrowth gallium nitride for light extraction enhancement. *Opt Express*, 2010, 18(10): 10674–10684
- 8 Oliver R A, Bennett S E, Sumner J, et al. Scanning capacitance microscopy studies of GaN grown by epitaxial layer overgrowth. *J Phys Conf Ser*, 2010, 209: 012049–012052
- 9 Bishop S M, Park J S, Gu J, et al. Growth evolution and pendeoepitaxy of non-polar AlN and GaN thin films on 4H-SiC (1120). *J Cryst Growth*, 2007, 300(1): 83–89
- 10 Liliental W Z. TEM studies of GaN layers grown in non-polar direction: Laterally overgrown and pendeo-epitaxial layers. *J Cryst Growth*, 2008, 310(17): 4011–4015
- 11 Huang X H, Liu J P, Fan Y M, et al. Improving InGaIn-LED performance by optimizing the patterned sapphire substrate shape. *Chin Phys B*, 2012, 21(3): 037105–037110
- 12 Lee J H, Oh J T, Choi I S, et al. Growth and characteristics of InGaIn/GaN films grown on hemispherical patterned sapphire by using MOCVD. *J Korean Phys Soc*, 2007, 51: 249–252
- 13 Tae S O, Ah H P, Hyun J, et al. Spatial stress distribution and optical properties of GaN films grown on convex shape-patterned sapphire substrate by metalorganic chemical vapor deposition. *J Alloy Compd*, 2011, 509: 2952–2956
- 14 Lee J H, Oh J T, Kim Y C, et al. Stress reduction and enhanced extraction efficiency of GaN-based LED grown on cone-shape-patterned sapphire. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(18): 1563–1565
- 15 Song J C, Lee S H, Lee I H, et al. Characteristics comparison between GaN epilayers grown on patterned and unpatterned sapphire substrate

- (0 0 0 1). J Cryst Growth, 2007, 308: 321–324
- 16 Pan C C, Hsieh Ch H, Lin C W, et al. Light output improvement of InGaN ultraviolet light-emitting diodes by using wet-etched stripe-patterned sapphire substrates. J Appl Phys, 2007, 102 (8): 084503–084507
- 17 Srikant V, Speck J S, Clarke D R. Mosaic structure in epitaxial thin films having large lattices mismatch. J Appl Phys, 1997, 82(9): 4286–4295
- 18 Khan N, Li J. Effects of compressive strain on optical properties of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ quantum wells. Appl Phys Lett, 2006, 89: 151916–151918
- 19 Loudon R. The Raman effecting in crystals. Adv Phys, 13, 1964, 13(52): 423–482
- 20 Wang H Y, Xu H, Huang T T, et al. Thermodynamics of wurtzite GaN from first-principle calculation. Eur Phys J B, 2008, 62: 39–43
- 21 Bungaro C, Rapcewicz K, Bernholc J. *Ab initio* phonon dispersions of wurtzite AlN, GaN, and InN. Phys Rev B, 2000, 61: 6720–6725
- 22 Zhao D G, Xu S J, Xie M H, et al. Stress and its effect on optical properties of GaN epilayers grown on Si(111), 6H-SiC(0001), and c-plane sapphire. Appl Phys Lett, 2003, 83: 677–679
- 23 He H P, Zhuge F, Ye Z Z, et al. Strain and its effect on optical properties of Al-N codoped ZnO films. J Appl Phys, 2006, 99: 023503–023507

Influence of cone-shaped pattern sapphire substrates on dislocation density and stress-strain of GaN epilayers by MOCVD

WANG HuanYou^{1,2*}, LI YaLan^{1,3}, XIE GuangQi¹ & LI MingJun²

¹ Department of Physics and Electronic Information Engineering, Xiangnan University, Chenzhou 423000, China;

² School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410083, China;

³ College of Physical Science and Technology, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China

GaN epilayers are grown on the $2.5\ \mu\text{m}\times 1.6\ \mu\text{m}\times 0.5\ \mu\text{m}$ cone-shaped pattern sapphire substrates (CPSS) and unpattern planar sapphire substrates (USS) by MOCVD. High resolution X-ray diffraction (HRXRD) measurements show that the edge dislocation density of GaN epilayers on CPSS is less than on USS. From the transmission electron microscopy (TEM) observation, the CPSS can efficiently reduce the threading dislocation in GaN epilayer. The Raman scattering spectroscopy show that the CPSS can effectively decrease the residual stress in GaN epilayer. A strong and sharp PL band edge emission was observed for the GaN grown on CPSS compared to USS. The above result indicates the quality of GaN epilayers on CPSS is advantage to GaN epilayer on USS.

CPSS, GaN, threading dislocation, stress-strain

PACS: 81.05.Ea, 81.15.Gh, 78.66.Fd, 61.72.Ff

doi: 10.1360/132013-87