

引用:郭一庸,武智波,徐昊一,等. 应力释放对 InGaN/GaN 量子阱有源区发光特性的影响机制[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2026, 39(2): 249-254.

Citation: GUO Yiyong, WU Zhibo, XU Haoyi, LI Changfu, GAO Yuan, JI Ziwu. Mechanism of strain relaxation effects upon luminescence characteristics of InGaN/GaN quantum well active regions [J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2026, 39(2): 249-254.

文章编号 1672-6634(2026)02-0249-06

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025100010

应力释放对 InGaN/GaN 量子阱有源区 发光特性的影响机制

郭一庸¹, 武智波¹, 徐昊一², 李长富², 高渊^{1,3}, 冀子武¹

(1. 山东大学 集成电路学院, 山东 济南 250100; 2. 泰山学院 物理与电子工程学院, 山东 泰安 271021;

3. 中国电子科技集团公司 第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要 制备了两个不同的绿光 InGaN/GaN 量子阱(QW)结构(具有和不具有应力释放层),研究了其电致发光(EL)的注入电流依赖性和光致发光(PL)的温度依赖性。EL 测量结果显示,与不具有应力释放层的 QW 结构(S1)相比,具有应力释放层的 QW 结构(S2)有一个较强的 EL 强度、显著的能量红移和一个较小的效率下垂;而 PL 测量结果则显示了 S2 比 S1 有更少的非辐射中心、更大的活化能和更高的内量子效率。这些结果表明,应力释放层的导入不仅缓解了有源区的应力、增加了 In 原子的并入,还提高了其有源区的结构质量、增强了其局域效果,同时降低了其电子泄露。这一解释得到了高分辨率 X 射线衍射测量结果的证实,结果显示 S2 比 S1 有更低的位错密度和更好的结构/结晶质量。

关键词 InGaN/GaN 量子阱;应力释放层;电致发光;光致发光;效率下垂;内量子效率

中图分类号 TB34

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Mechanism of strain relaxation effects upon luminescence characteristics of InGaN/GaN quantum well active regions

GUO Yiyong¹, WU Zhibo¹, XU Haoyi², LI Changfu², GAO Yuan^{1,3}, JI Ziwu¹

(1. School of Integrated Circuits, Shandong University, Jinan 250100, China; 2. School of Physics and Electronic Engineering,

University of Taishan, Taian 271021, China; 3. The 13th Research Institute, China Electronics

Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract Two different green-emitting InGaN/GaN quantum well (QW) structures, with and without a strain-relieving layer, were prepared, and their injection current-dependence of electroluminescence (EL) and temperature dependence of photoluminescence (PL) were investigated. The EL measurements indicated that, comparing with the QW structure without a strain-relieving layer (S1), the QW structure with a strain-relieving layer (S2) exhibits a stronger EL intensity, a significant energy redshift, and a smaller efficiency droop. In contrast, the PL measurements indicated that S2 has fewer non-radiative centers, a lar-

收稿日期: 2025-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52272157, 51872167)资助

通信作者: 冀子武, 男, 汉族, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 低维半导体材料与器件的光电特性, E-mail: jiziwu@sdu.edu.com; 高渊, 男, 汉族, 高级工程师, 研究方向: 半导体器件及工艺技术, E-mail: gaoyuan622@126.com; 李长富, 男, 汉族, 博士, 讲师, 研究方向: 宽禁带半导体及器件, E-mail: sdtalcf1@163.com。

ger activation energy, and a higher internal quantum efficiency than S1. These results reflected the fact that the introduction of the strain-relieving layer not only relieves the stress in the active region and enhances the incorporation of Indium atoms, but also improves the structural quality of the active region, strengthens the carrier localization effect, and suppresses electron leakage. Such explanation is consistent with the high-resolution X-ray diffraction measurements, which have shown that S2 has a less dislocation density and better structural/crystalline quality than S1.

Keywords InGaN/GaN quantum well; strain-relieving layer; electroluminescence; photoluminescence; efficiency droop; internal quantum efficiency

0 引言

1995年中村修二团队研制出首只室温脉冲激励的 GaN 基紫光激光二极管(LD)^[1]。随着材料生长工艺与结构设计的不断优化和创新, GaN 基 LD 的辐射波长范围也逐渐扩大至深紫外—绿光波段^[1-4], 使其在工业加工、激光显示与光纤通信等领域具有更广阔的潜在应用前景。在过去的几十年间, 在提升短波长(如蓝光) InGaN/GaN 多量子阱(MQWs)的发光效率方面已经取得了较大的进展^[5-9], 并实现了其商业应用, 但在提升其长波长(如绿光)发光效率方面仍面临着许多困难需要克服。

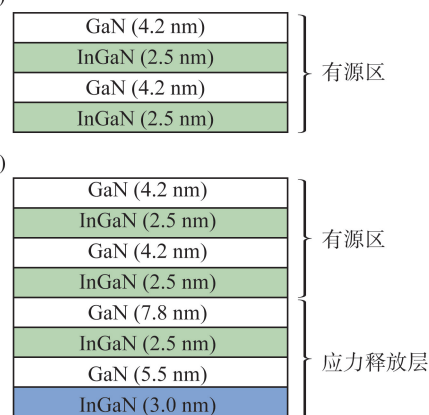
一般认为, In 原子与 Ga 原子之间的尺寸差异以及 InN 与 GaN 之间的晶格失配, 不仅会导致 InGaN 外延层中的组分起伏或相分离, 从而造成非辐射中心的产生^[10-12], 而且还会导致 GaN 垒层与 InGaN 阱层之间产生应力, 并因此诱发量子限制斯塔克效应(QCSE)^[13], 从而导致发光效率的进一步降低。此外, 在较高的注入电流范围内, 随着注入电流的增加 MQWs 的电子泄露现象也会逐渐增强, 并因此导致外量子效率(EQE)的显著降低, 这一现象被称为效率下垂(efficiency droop)现象^[14-15]。值得注意的是, 随着辐射波长的增加(即 In 组分的增加), 上述现象会变得更加显著, 相应地, 其外量子效率也会展现一个更加显著的降低。这个现象被称为黄绿鸿沟(green gap)^[16], 也是当前阻碍长波长 InGaN/GaN MQWs 基 LED 或 LD 外量子效率提高的主要因素之一。

为了降低或消除上述 InGaN/GaN MQWs 结构中应力造成的不利影响, 许多新的研究方法已经被探索。如非极性或半极性衬底的应用^[17-21], 有源区内应力释放层的导入^[22-26], 以及低温 p-GaN 的插入等^[26-27]。此外, 也有报道指出^[28], 通过引入蓝光 InGaN/GaN MQWs 结构作为绿光 InGaN/GaN MQWs 有源区的应力释放层, 可显著改善有源区的晶体质量。

为了探讨应力释放对发光特性的影响, 本研究制备了两种不同的 InGaN/GaN QWs 基绿光结构(S1 和 S2): 前者无应力释放层, 而后者则具有应力释放层; 通过高分辨率 X 射线衍射(HR-XRD)、电致发光(EL)和光致发光(PL)测量, 系统地研究了应力释放影响有源区复合发光的 (a) 内在机制。

1 实验

本研究利用 MOCVD 系统在(0001)取向的蓝宝石衬底上生长了两个不同的绿光 InGaN/GaN QW 结构(样品 S1 和 S2)。其中, 样品 S1 的结构包括: (1) 低温 GaN 成核层、高温未掺杂 GaN 层和 Si 掺杂 n-GaN 层、n-AlGaIn 覆盖层和 n-InGaIn 波导层; (2) 两个周期的 InGaIn(2.5 nm)/GaN (4.2 nm) 量子阱有源区[如图 1(a)]; (3) 高温 p-AlGaIn 电子阻挡层(EBL)、p-InGaIn 波导层、p-AlGaIn 覆盖层和 p-GaN 接触层。样品 S2 与样品 S1 的唯一不同之处在于[图 1(b)]: 在其(即样品 S2)n-InGaIn 波导层和有源区之间额外导入了一个蓝光 InGaIn(3.0 nm)/GaN(5.5 nm) QW 和一个绿光 InGaIn (2.5 nm)/GaN (7.8 nm) QW 作为应力释放层, 以缓解其有源区的应



注: (a) S1; (b) S2。

图 1 样品的有源区结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the active region structures of samples

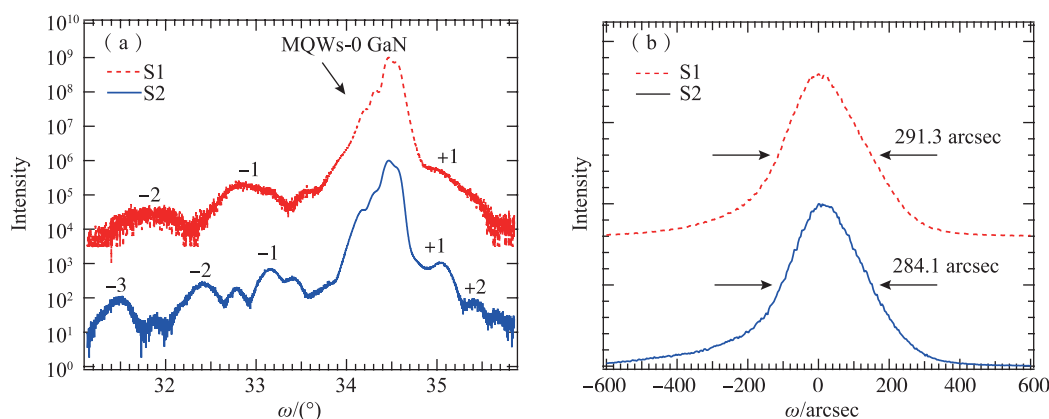
力。阱层和垒层的生长温度分别为 750 °C 和 850 °C。

采用 HRXRD 表征样品的结构特性。而对于变电流 EL 和变温 PL 测量,则分别采用 Keithley 2400 电流源(0.05~50 mA)和 405 nm 半导体激光器(光斑尺寸约 250 μm ,功率范围为 203.8~1 630.4 kW/cm^2)作为激发源,将样品置于具有温控仪调控的液氮封闭循环装置内(6~300 K),获得样品的 EL 和 PL 信号,信号经 iHR 320 分光仪分光,然后再由计算机控制的 CCD (Synapse)进行采集。

2 测试结果与分析

2.1 HRXRD 分析

图 2(a)展示了样品 S1 与 S2 的 HRXRD ω -2 θ 曲线。最尖锐的主衍射峰源于 GaN 层的(002)晶面(标记为 GaN),而位于主峰左侧的较低强度的反射峰则由 InGaN/GaN 多量子阱层衍射产生(标记为 MQWs-0),并且在 MQWs-0 衍射峰的两侧均出现卫星峰。如图所示,样品 S1 与 S2 的卫星峰均清晰可辨,这表明两样品的有源区均具有显著的阱/垒交替的周期性结构特征,且阱/垒界面陡峭^[27]。此外,通过比较还可发现,与样品 S1 相比,样品 S2 的卫星峰具有更窄的峰宽和更高的强度,这说明后者具有更陡峭的阱/垒界面和更优的晶体质量^[29]。图 2(b)显示了样品 S1 与 S2 的(102)晶面 HRXRD 摇摆曲线。结果表明,样品 S1 与 S2 的摇摆曲线的半高宽分别为 291.3 与 284.1 arcsec。由于摇摆曲线的半高宽通常能够表征结构位错的密度^[30-31],因此上述结果反映了样品 S2 的位错密度略低于 S1。这与前述的针对图 2(a)的分析结果也是一致的,即样品 S2 比样品 S1 有更少的位错和更好的结构质量。



注:(a) GaN (002)晶面上的 ω -2 θ 曲线;(b) (102)晶面的摇摆曲线。

图 2 样品 S1 和 S2 的 HRXRD ω -2 θ 曲线和摇摆曲线

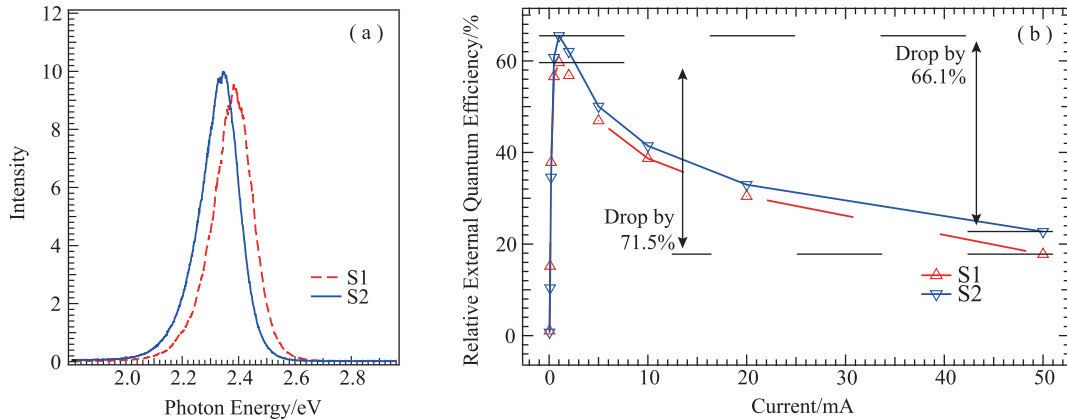
Fig. 2 HRXRD ω -2 θ curves and rocking curves of samples S1 and S2

2.2 样品的 EL 特征

图 3(a)显示了两样品在室温下的典型 EL 谱。由图可见,在相同的电流注入条件(2 mA)下,样品 S1 和 S2 均为绿光辐射,并且它们的峰位能量分别为 2.343 和 2.386 eV。此外,由图 3(a)还可观察到,与样品 S1 相比,尽管样品 S2 显示了一个较强的 EL 强度和一个 43 meV 的峰位红移,但它们的 EL 线宽却几乎是相同的。这些结果表明,样品 S2 的能量红移,并非起因于 QCSE 的作用,因为 QCSE 不仅能导致 EL 的能量降低,同时还会导致 EL 的线宽增加和强度减弱^[13]。取而代之的是,上述红移应被归因于样品 S2 阱层中 In 组分的增加,并因此导致了其禁带宽度的降低。这是因为,样品 S2 结构中应力释放层的导入,导致了后续外延层的应力释放,并因此促进了有源区 In 原子的并入^[32-33]。

为了调查应力释放层对效率下垂的影响,图 3(b)显示了 300 K 条件下样品 S1 和 S2 的相对外量子效率 (REQE) 的电流依赖性。REQE 被定义为:积分 EL 强度除以注入电流。由图 3(b)可见,当注入电流从 0.05 mA 增加到 50 mA 时,两个样品均表现出明显的效率下垂:两个样品的 REQE 首先均显著增加,并且在 1 mA 的临界电流处达到最大值,然后单调降低。前者可被归因于支配性的非辐射复合^[34-36],而后者则主要是由于电子泄露^[34-35,37]。然而,作为比较,两样品在整个测量电流范围内的效率下垂程度却不相同:S1 为

71.5%,而S2则为66.1%。样品S2的这个较小的效率下垂以及前述的较强的EL强度,可能反映了以下这个事实,即应力释放层的导入不仅有助于阱层中In原子的并入,而且还降低了有源区的应力和极化强度,并且因此减小了其能带结构的倾斜程度,抑制了电子的泄露^[38-39]。



注:(a) 2 mA 下的 EL 谱;(b) 相对效率的注入电流依赖性。

图3 室温下样品S1和S2的EL谱和相对效率的注入电流依赖性

Fig. 3 EL spectra and current-dependent relative efficiency of samples S1 and S2 at room temperature

2.3 样品的PL特征

为了进一步探讨非辐射中心影响复合发光的热猝灭机制,图4给出了激发密度为 407.5 kW/cm^2 时两个样品归一化积分PL强度随温度变化的阿伦尼乌斯(Arrhenius)图。由图可见,随着温度的增加,这两个样品的积分PL强度均显示了一个单调的降低,这说明该过程中非辐射复合也在不断增强。对于这些实验数据,可通过Arrhenius方程 $I(T) = [1 + C \exp(-E/k_B T)]^{-1}$ 来进行拟合^[26,40],式中 $I(T)$ 是温度为 T 时归一化积分PL强度, C 是与非辐射复合中心密度相关的系数, E 是与非辐射复合相关的活化能, k_B 是玻尔兹曼常量。拟合结果显示,样品S1与S2的 C 值分别为31.6和19.3, E 值分别为38.7和44.2 meV。此外,由图4还可观察到,样品S1和S2的积分PL强度的最大值均出现在50 K左右,而非最低温度6 K处,这显示了该量子阱结构具有明显的与In组分起伏相关的载流子局域效应^[41-43]。假设样品S1和S2在50 K左右的内量子效率(IQE)均为100%,则其在300 K的IQE分别为7.0%和18.9%^[44]。由图4得到的这些结果显示,与样品S1相比,样品S2具有更小的 C 值、更大的 E 值以及更高的IQE值。这些结果也进一步巩固了前面得到的结论,即相较于S1,S2有更低的缺陷密度、更大的活化能,并且因此有更显著的由较高In组分诱发的载流子局域效应和更高的IQE^[26]。

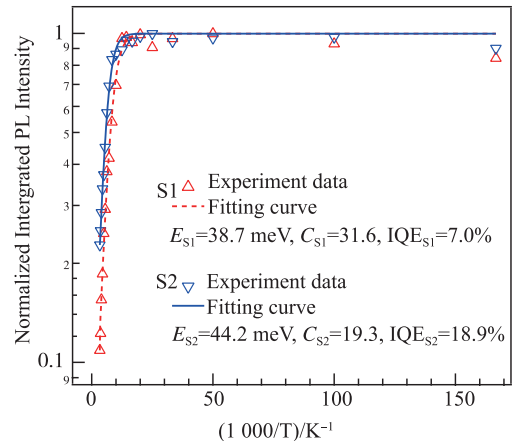


图4 407.5 kW/cm^2 激发密度下样品S1与S2的归一化积分PL强度的温度依赖性Arrhenius图及其拟合曲线

Fig. 4 Arrhenius plot of normalized integrated PL intensity as a function of temperature and fitting curves of samples S1 and S2 at 407.5 kW/cm^2

3 结论

采用MOCVD方法在(0001)取向的蓝宝石衬底上外延生长了两个不同的绿光InGaN/GaN量子阱结构S1和S2(S1和S2分别为不具有和具有应力释放层的结构),并且对它们的EL和PL特性进行了测量。EL结果显示,应力释放层的导入不仅有助于阱层中In原子的并入,而且还降低了有源区的极化场强度,并因此减少了电子的泄露;PL测量结果显示,应力释放层的导入不仅能降低有源区的缺陷密度,而且还可增加其活化能。因此,应力释放层的导入可有效改善效率下垂并提高量子效率,并且这也与HRXRD的测量结

果相吻合,因为后者已经显示了样品 S2 比样品 S1 有更少的位错密度和更好的结构/结晶质量。

参 考 文 献

- [1] NAKAMURA S, SENOH M, NAGAHAMA S I, et al. InGa_N-based multi-quantum-well-structure laser diodes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1996, 35(1B): L74.
- [2] CHEN F, JI X H, LAU S P. Recent progress in group III-nitride nanostructures: from materials to applications[J]. Materials Science and Engineering R Reports, 2020, 142: 100578.
- [3] DEVITSKY O V, PASHCHENKO A S, LUNIN L S, et al. Advances and perspectives in the growth of III-N heterostructures for solar cells: an overview[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025, 292: 113818.
- [4] 武智波, 贺龙飞, 吴宗豪, 等. 近紫外 Ga_N 基量子阱结构的局域和极化效应[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(2): 218-223.
- [5] SHEEN M, KO Y, KIM D U, et al. Highly efficient blue InGa_N nanoscale light-emitting diodes[J]. Nature, 2022, 608(7921): 56-61.
- [6] LIU C C, CHEN Y H, HOUNG M P, et al. Improved light-output power of Ga_N LEDs by selective region activation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(6): 1444-1446.
- [7] JEONG T, PARK H J, JU J W, et al. High efficiency InGa_N blue light-emitting diode with >4-W output power at 3 A[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(7): 649-652.
- [8] YEN S H, TSAI M C, TSAI M L, et al. Effect of n-type AlGa_N layer on carrier transportation and efficiency droop of blue InGa_N light-emitting diodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(14): 975-977.
- [9] XIONG J Y, ZHENG S W, FAN G H. Performance enhancement of blue InGa_N light-emitting diodes with InGa_N barriers and dip-shaped last barrier[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(11): 3925-3929.
- [10] CHERNS D, HENLEY S J, PONCE F A. Edge and screw dislocations as nonradiative centers in InGa_N/Ga_N quantum well luminescence[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(18): 2691-2693.
- [11] HO I H, STRINGFELLOW G B. Solid phase immiscibility in GaIn_N[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(18): 2701-2703.
- [12] JU G X, TABUCHI M, TAKEDA Y, et al. Role of threading dislocations in strain relaxation during GaIn_N growth monitored by real-time X-ray reflectivity[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(26): 262105.
- [13] TAKEUCHI T, SOTA S, KATSURAGAWA M, et al. Quantum-confined stark effect due to piezoelectric fields in GaIn_N strained quantum wells[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1997, 36(4A): L382.
- [14] HUMPHREYS C J, GRIFFITHS J T, TANG F, et al. The atomic structure of polar and non-polar InGa_N quantum wells and the green gap problem[J]. Ultramicroscopy, 2017, 176: 93-98.
- [15] KARPOV S Y, KARPOV S Y. Effect of carrier localization on recombination processes and efficiency of InGa_N-based LEDs operating in the "green gap"[J]. Applied Sciences, 2018, 8(5): 818.
- [16] SHI K J, LI H B, MA W, et al. Effect of InGa_N growth interruption on photoluminescence properties of an InGa_N-based multiple quantum well structure[J]. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2020, 119: 113982.
- [17] LIU F, ZHANG Z H, RONG X, et al. Graphene-assisted epitaxy of nitrogen lattice polarity Ga_N films on non-polar sapphire substrates for green light emitting diodes[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(22): 2001283.
- [18] FISCHER A M, WU Z H, SUN K W, et al. Misfit strain relaxation by stacking fault generation in InGa_N quantum wells grown on *m*-plane Ga_N[J]. Applied Physics Express, 2009, 2(4): 041002.
- [19] MUKUNDAN S, MOHAN L, CHANDAN G, et al. Semipolar and nonpolar Ga_N epi-films grown on *m*-sapphire by plasma assisted molecular beam epitaxy[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(20): 204502.
- [20] JEONG H, KIM H, JEONG M S. Two-dimensional confocal photoluminescence spectroscopy of nonpolar *a*-plane InGa_N/Ga_N multiple quantum wells[J]. Ceramics International, 2023, 49(5): 8607-8613.
- [21] JIU L, GONG Y, WANG T. Overgrowth and strain investigation of (11-20) non-polar Ga_N on patterned templates on sapphire[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 9898.
- [22] KARAN H, BISWAS A. Improving performance of light-emitting diodes using InGa_N/Ga_N MQWs with varying trapezoidal bottom well width[J]. Optik, 2021, 247: 167888.
- [23] SHI K J, WANG C X, LI R, et al. Influence of interface structure in the active region on photoluminescence in InGa_N/Ga_N quantum wells[J]. Micro and Nanostructures, 2023, 177: 207544.
- [24] WU H C, LI H, KUO S Y, et al. High output power Ga_N-based green resonant-cavity light-emitting diodes with trapezoidal quantum wells[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(9): 3650-3654.
- [25] KIM S J, LEE K J, PARK S J. Alleviation of efficiency droop in InGa_N/Ga_N multiple quantum well light-emitting diodes with trapezoidal quantum barriers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(25): 25LT01.
- [26] LI R, WANG C X, SHI K J, et al. Effect of low-temperature interlayer in active-region upon photoluminescence in multiple-quantum-

- well InGa_N/Ga_N[J]. *Journal of Luminescence*, 2022, 244: 118741.
- [27] LI J F, CHEN D, LI K L, et al. Optical properties of Ga_N-based green light-emitting diodes influenced by low-temperature p-Ga_N layer [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(11): 3134.
- [28] WANG Y C, YANG J, LIANG F, et al. Strain control and its effect on the optical properties of InGa_N/Ga_N multiple quantum wells[J]. *Journal of Luminescence*, 2024, 266: 120335.
- [29] KHAPACHEV Y P. The theory of dynamical X-ray diffraction on a superlattice[J]. *Physica Status Solidi (b)*, 1983, 120(1): 155-163.
- [30] DUNN C G, KOGH E F. Comparison of dislocation densities of primary and secondary recrystallization grains of Si-Fe[J]. *Acta Metallurgica*, 1957, 5(10): 548-554.
- [31] METZGER T, HÖPLER R, BORN E, et al. Defect structure of epitaxial Ga_N films determined by transmission electron microscopy and triple-axis X-ray diffractometry[J]. *Philosophical Magazine A*, 1998, 77(4): 1013-1025.
- [32] KAWAGUCHI Y, SHIMIZU M, HIRAMATSU K, et al. The composition pulling effect in InGa_N growth on the Ga_N and AlGa_N epitaxial layers grown by MOVPE[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 1996, 449(1): 89-94.
- [33] BEN Y H, LIANG F, ZHAO D G, et al. The direct evidence of the composition pulling effect and its role in InGa_N multiple quantum wells[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 2228-2237.
- [34] SCHEIBENZUBER W G, SCHWARZ U T, SULMONI L, et al. Recombination coefficients of Ga_N-based laser diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(9): 093106.
- [35] VERZELLESI G, SAGUATTI D, MENEGHINI M, et al. Efficiency droop in InGa_N/Ga_N blue light-emitting diodes: physical mechanisms and remedies[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(7): 071101.
- [36] SHIN D S, HAN D P, OH J Y, et al. Study of droop phenomena in InGa_N-based blue and green light-emitting diodes by temperature-dependent electroluminescence[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(15): 153506.
- [37] AHN B J, KIM T S, DONG Y Q, et al. Experimental determination of current spill-over and its effect on the efficiency droop in InGa_N/Ga_N blue-light-emitting-diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(3): 031905.
- [38] CHANG L B, LAI M J, LIN R M, et al. Effect of electron leakage on efficiency droop in wide-well InGa_N-based light-emitting diodes [J]. *Applied Physics Express*, 2011, 4(1): 012106.
- [39] ANCHAL N, SAHOO B K. Effect of strain on internal quantum efficiency of InGa_N/Ga_N blue LED[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 28(1): 311-313.
- [40] SHAN X Y, LI Y Z, YU H B, et al. Temperature-dependent electroluminescence of red high-In-content MQWs of dual-wavelength micro-LED[J]. *Optics Express*, 2024, 32(11): 20412-20420.
- [41] SHI K J, WANG C X, LI R, et al. Influence of in volatilization on photoluminescence in InGa_N/Ga_N multiple quantum wells[J]. *Materials Express*, 2021, 11(12): 2033-2038.
- [42] SUN H, JI Z W, WANG H N, et al. Transfer and recombination mechanism of carriers in phase-separated InGa_N quantum wells[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(9): 093508.
- [43] WANG H N, JI Z W, QU S, et al. Influence of excitation power and temperature on photoluminescence in InGa_N/Ga_N multiple quantum wells[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 3932-3940.
- [44] WANG X S, JI Z W, WANG H N, et al. Internal quantum efficiency of InGa_N/Ga_N multiple quantum well[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(12): 127801.

(责任编辑:蒲锡鹏)