

文章编号: 1000-7032(2026)02-0307-07

具有超晶格电子减速层的氮极性 InGaN 基红光 LED 仿真研究

王宗昊, 王昱森, 左长财, 赵敬凯, 高浩哲, 刘宇亮,
邓高强*, 杨天鹏, 张源涛*

(吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子全国重点实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 当前, InGaN 基红光 LED 较低的发光效率制约着氮化物 RGB 全彩 Micro-LED 显示技术的发展和應用。提升 InGaN 基红光 LED 量子阱有源区的载流子限制能力和晶体质量是提高其发光效率的重要途径。本工作提出了一种具有 n-In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN 超晶格电子减速层(EDL)但无 p-AlGaIn 电子阻挡层(EBL)的氮极性 InGaN 基红光 LED 器件结构。数值模拟结果表明, 超晶格 EDL 可显著降低电子热速度, 提升量子阱的电子捕获效率。并且, 该器件结构在降低空穴注入势垒即提升量子阱空穴捕获效率的同时, 仍具备高的电子阻挡势垒, 能够有效抑制量子阱中电子的溢出。与具有 p-AlGaIn EBL 的氮极性 InGaN 基红光 LED 参考器件相比, 该器件的峰值内量子效率和光输出功率分别提高了 16% 和 32%。重要的是, 本工作提出的红光 LED 结构中, 无 p-AlGaIn EBL, 能够有效避免 p-AlGaIn EBL 高生长温度导致的量子阱晶体质量恶化问题, 有利于推动高发光效率 InGaN 基红光 Micro-LED 的制备。

关键词: InGaN; 红光 LED; 氮极性; 电子减速层

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20250229

CSTR: 32170. 14. CJL. 20250229

Simulation Study of N-polar InGaN-based Red LEDs with Superlattice Electron Deceleration Layer

WANG Zonghao, WANG Yusen, ZUO Changcai, ZHAO Jingkai, GAO Haozhe, LIU Yuliang,
DENG Gaoqiang*, YANG Tianpeng, ZHANG Yuantao*

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University,
Changchun 130012, China)

* Corresponding Authors, E-mail: denggq@jlu.edu.cn; zhangyt@jlu.edu.cn

Abstract: The low emission efficiency of InGaN-based red LEDs remains a critical bottleneck for realizing full-color nitride-based RGB Micro-LED displays. Enhancing carrier confinement and crystalline quality in the quantum well (QW) active region is essential to improving optical performance. Here, we propose an N-polar InGaN-based red LED featuring an n-In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN superlattice electron deceleration layer (EDL) while removing the conventional p-AlGaIn electron blocking layer (EBL). Numerical simulations show that the superlattice EDL effectively reduces electron thermal velocity and increases electron capture efficiency within the QWs. Meanwhile, the design maintains a high electron confinement barrier and lowers the hole injection barrier, improving hole capture efficiency and suppressing electron overflow. Compared with a reference N-polar InGaN based red LED with a p-AlGaIn EBL, the proposed device achieves a 16% increase in peak internal quantum efficiency and a 32% rise in optical output

收稿日期: 2025-10-30; 修订日期: 2025-11-19

基金项目: 国家科技重大专项(2025ZD0615800); 国家自然科学基金(U22A20134, U24A20300, 62474080); 吉林省科技发展计划项目(SKJ202402002)

Supported by Advanced Materials-National Science and Technology Major Project(2025ZD0615800); National Natural Science Foundation of China(U22A20134, U24A20300, 62474080); Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province(SKJ202402002)

power. Furthermore, eliminating the p-AlGaN EBL avoids QW crystal degradation caused by high-temperature AlGaN growth, offering a promising route toward high-efficiency InGaN-based red Micro-LEDs.

Keywords: InGaN; red light-emitting diodes; nitrogen polarity; electron deceleration layer

1 引 言

基于 InGaN 材料的 Micro-LED 显示技术具有高亮度、高可靠性和低功耗等优势,在可穿戴设备、虚拟现实(VR)、增强现实(AR)和可见光通信(VLC)等领域展现了广阔的应用前景^[1-3]。然而,当前 InGaN 基红光 Micro-LED 较低的发光效率制约了氮化物 RGB 全彩 Micro-LED 显示技术的发展和应用^[4]。为了获得红光发射(>620 nm),InGaN 量子阱需在较低温度生长以提升阱层中的 In 组分。但是,这也加剧了 AlGaN 电子阻挡层(EBL)较高生长温度对量子阱的热分解作用,导致量子阱晶体质量恶化,发光波长蓝移^[5-7]。为此,较多的研究团队将 AlGaN EBL 从 InGaN 基红光 LED 结构中移除^[8-11]。但是,这也导致了红光 LED 有源区电子不均匀分布和泄漏电流增加,使器件发光效率和稳定性下降。因此,同时提升 InGaN 基红光 LED 量子阱有源区的载流子限制能力和晶体质量对提升其发光性能十分关键。为了抑制 LED 中电子的泄漏,科研人员提出使用改进型的 EBL 设计,例如 In-AlGaN/GaN 超晶格 EBL^[12]和隧道结结构^[13];或者使用特殊设计的有源区结构,如组分逐渐增加的混合量子阱^[14]、阶梯组分量子势垒层^[15]和 InN 插入层^[16]等。与此同时,也有科研人员在 n 型区与有源区之间引入电子减速层(EDL),目的是降低注入电子的热速度,从而缓解电子的泄漏^[17-19]。

本工作中,我们提出了一种具有 n-In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN 超晶格 EDL 但无 p-AlGaN EBL 的氮极性 InGaN 基红光 LED 器件结构。该结构有助于平衡红光量子阱中载流子限制能力与晶体质量之间的矛盾。数值模拟结果表明,一方面,超晶格 EDL 能够有效降低电子热速度,提升量子阱对电子的捕获效率,使得电子在有源区的分布更加均匀;另一方面,氮极性材料中相反的极化电场可使器件在无 p-AlGaN EBL 情况下仍能保持高达 1.14 eV 的电子阻挡势垒,能够有效抑制量子阱中电子的溢出;同时,器件还具有较低的空穴注入势垒。与具有 p-AlGaN EBL 的氮极性 InGaN 基红光 LED 参考器件相比,该器件的峰值内量子效率和光输出功

率分别提高了 16% 和 32%。更为重要的是,氮极性超晶格 EDL 与传统的金属极性超晶格 EDL 相比电子减速效果更强,使得其在缓解大电流密度下的 Droop 效应时效果提升了约 12.9%。此外,氮极性 InGaN 量子阱能够在更高的温度下生长^[20-22],并且无 p-AlGaN EBL 的结构能够避免高生长温度导致的量子阱晶体质量恶化问题,有利于推动高发光效率 InGaN 基红光 Micro-LED 的制备。

2 实 验

本工作采用 Crosslight 公司 Advanced Physical Models of Semiconductor Devices (APSYS) 软件对 InGaN 基红光 LED 进行了二维器件模拟。具有 p-AlGaN EBL 的氮极性 InGaN 基红光 LED (参考器件 N-LED A) 结构示意图如图 1(a) 所示。器件由 5 μm 厚 n-GaN 层(Si 掺杂,浓度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、5 对 In_{0.44}Ga_{0.56}N (2.5 nm)/In_{0.3}Ga_{0.7}N (12 nm) 多量子阱(MQWs)、40 nm 厚的 p-Al_{0.3}Ga_{0.7}N EBL (Mg 掺杂浓度 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 以及 100 nm 厚的 p-GaN 空穴注入层(Mg 掺杂浓度 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 构成。具有超晶格 EDL 但无 p-AlGaN EBL 的氮极性 InGaN 基红光 LED (N-LED B) 器件结构示意图如图 1(b) 所示。相比于 N-LED A, N-LED B 器件结构中不含 EBL 层,但在 n-GaN 与有源区之间引入了 7 对 n 型 In_{0.1}Ga_{0.9}N (4 nm)/GaN (2 nm) 超晶格结构作为 EDL (Si 掺杂浓度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)。Ga-LED C 为金属极性 LED 器件,其器件结构与 N-LED B 完全相同,如图 1(c) 所示。三个器件的台面横向尺寸均为 50 μm。

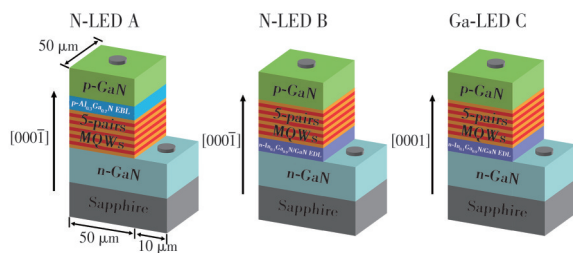


图 1 模拟中(a)N-LED A、(b)N-LED B和(c)Ga-LED C的器件结构示意图

Fig.1 Schematic diagrams of device structure of (a) N-LED A, (b) N-LED B, and (c) Ga-LED C

在模拟设置中,Shockley-Read-Hall(SRH)复合寿命设为 $10\text{ ns}^{[23]}$,俄歇复合系数为 $1 \times 10^{-30}\text{ cm}^6/\text{s}^{[24]}$ 。InGaN/GaN 异质结的导带和价带带阶比设定为 0.7:0.3^[25]。背景损耗和光提取效率分别取 $2\,000\text{ m}^{-1}$ 和 10%^[26]。考虑到缺陷和界面电荷对极化电荷的屏蔽效应,极化屏蔽因子设定为 0.4^[27]。其他材料参数参考文献[28]。

3 结果与讨论

我们模拟了 N-LED A 和 N-LED B 的电流-电压

(I - V)特性曲线,如图2(a)所示。两个LED的 I - V 特性曲线几乎重合,这说明它们的开启电压与串联电阻基本一致。然而,这两个LED的光学特性存在较大差异,如图2(b)所示。N-LED B的峰值内量子效率(IQE:53.7%)和光输出功率(LOP:9.6 mW)均高于 N-LED A 的峰值 IQE(46.2%)和 LOP(7.3 mW)。此外,N-LED B 在 $300\text{ A}/\text{cm}^2$ 电流密度时的 Droop 效应(约 24.3%)显著低于 N-LED A (约 32.8%)。这说明,虽然 N-LED B 结构中无 p-AlGaIn EBL,但其发光性能却优于带有 p-AlGaIn EBL 的 N-LED A。

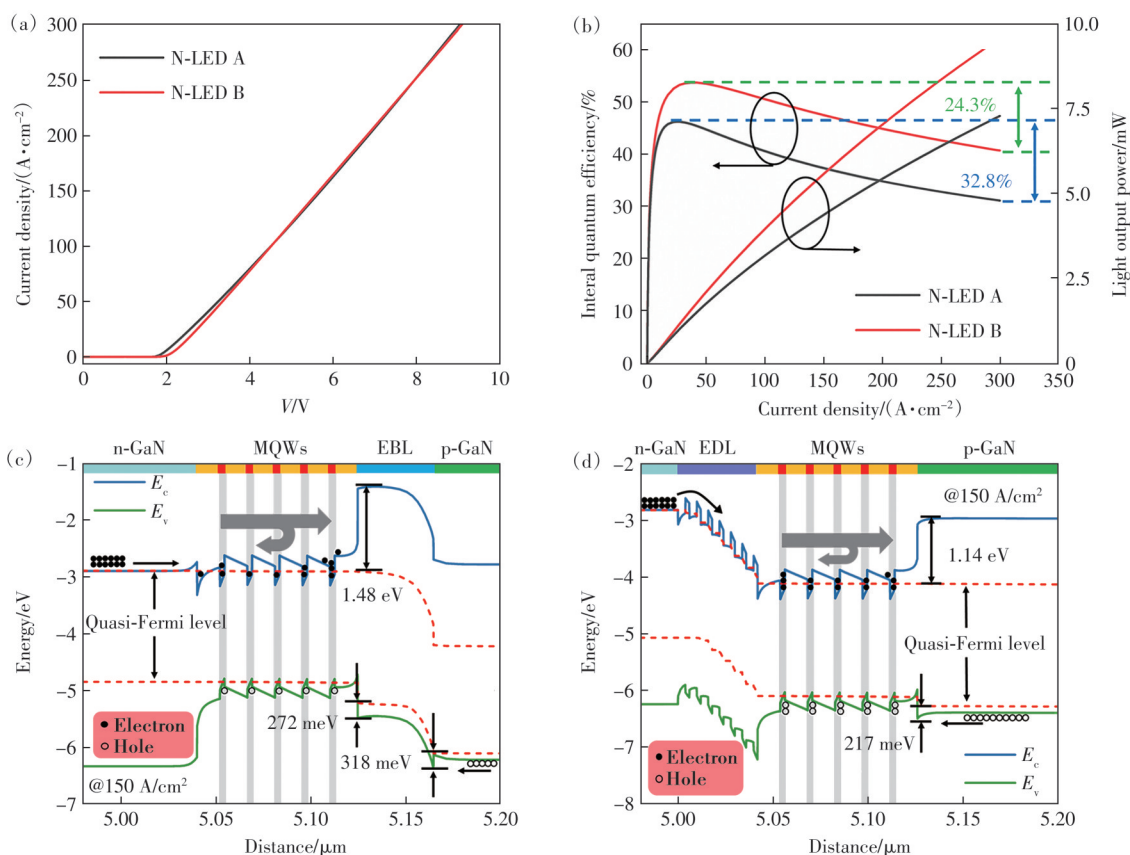


图2 N-LED A 和 N-LED B 的(a) I - V 特性曲线、(b)IQE 与 LOP 曲线; $150\text{ A}/\text{cm}^2$ 电流密度下, (c)N-LED A 和 (d)N-LED B 的能带图

Fig.2 (a) I - V characteristics, (b) IQE and LOP of N-LED A and N-LED B. Energy band diagrams of (c) N-LED A and (d) N-LED B at $150\text{ A}/\text{cm}^2$

为探究这两个器件发光性能产生差异的物理机制,我们模拟了它们在 $150\text{ A}/\text{cm}^2$ 电流密度下的能带图,如图2(c)、(d)所示。能带图中,电子准费米能级和导带之间的高度差定义为电子的有效势垒;空穴准费米能级和价带之间的高度差定义为空穴的有效势垒。对于 N-LED A, p-AlGaIn EBL 与最后一个量子势垒层(LQB)界面处形成了高的电子阻挡势垒,势垒高度为 1.48 eV 。在正向偏压工作条件下,从 n 型 GaN 注入量子阱

有源区的电子的热速度高,这会降低量子阱对注入电子的捕获率。高热速度的电子在 p-AlGaIn 形成的电子阻挡势垒作用下在靠近 EBL 的阱层中积累。需要注意的是, p-AlGaIn EBL 在形成较高的电子阻挡势垒的同时,也增加了空穴的注入势垒,如图2(c)所示,空穴注入量子阱中需要克服两个势垒,势垒高度分别为 318 meV 和 272 meV 。由于空穴的热速度较低,较高的空穴注入势垒使得空穴主要被靠近 p 型区一侧的量子阱捕获。由此

造成的载流子的不均匀分布会降低器件的发光效率。N-LED B 器件结构中无 p-AlGaIn EBL, 其空穴注入势垒显著降低至 217 meV, 如图 2(d) 所示, 这有利于增强 p-GaN 侧空穴向量子阱有源区的注入, 并提升空穴在量子阱中的分布均匀性。需要注意的是, 尽管 N-LED B 中无 p-AlGaIn EBL, 但其在 LQB 和 p-GaN 界面处仍能形成高的电子阻挡势垒 (1.14 eV)。并且, 该势垒高度高于与 N-LED A 相同器件结构的金属极性 LED 器件 (515 meV), 如

图 3(a) 所示, 可有效抑制量子阱中载流子的溢出。这展现出氮极性氮化物材料在红光 LED 制备方面的优势。特别是, 无 p-AlGaIn EBL 能够避免 p-AlGaIn EBL 高生长温度导致的量子阱晶体质量恶化问题, 有利于推动高发光效率 InGaIn 基红光 LED 的制备。此外, N-LED B 结构中的 EDL 能够降低从 n-GaN 注入量子阱有源区的电子的热速度, 显著提升量子阱对注入电子的捕获效率, 并提升量子阱中电子的分布均匀性。

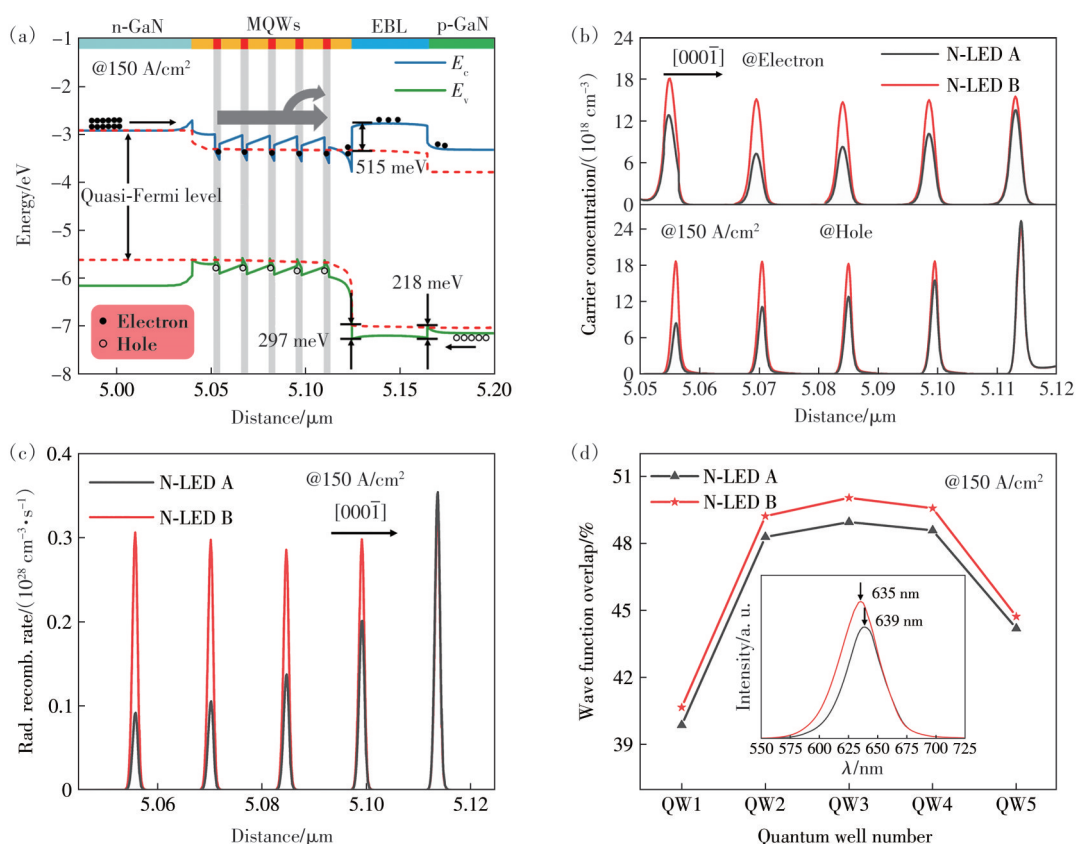


图 3 (a)与 N-LED A 结构相同的镓极性 LED 在 150 A/cm² 电流密度下的能带图; N-LED A 和 N-LED B 在 150 A/cm² 电流密度下的 (b) 载流子浓度分布图、(c) 辐射复合率分布及 (d) 波函数重叠度和 EL 发光光谱

Fig.3 (a) Energy band diagram of a Ga-polar LED with the same structure as N-LED A at 150 A/cm². (b) Carrier concentration, (c) radiative recombination rate, and (d) wavefunction overlap and EL spectra of N-LED A and N-LED B at 150 A/cm²

为验证基于能带分析的载流子输运特性, 我们模拟了 150 A/cm² 电流密度下 N-LED A 和 N-LED B 量子阱中的载流子浓度分布, 如图 3(b) 所示。可以看到, N-LED A 中电子和空穴的分布并不均匀, 其电子主要分布在靠近 n-GaN 和 p-GaN 侧的量子阱中, 空穴主要聚集在靠近 p 型 GaN 侧的量子阱中。与 N-LED A 相比, N-LED B 量子阱中电子和空穴浓度的分布均匀性显著增强, 并且量子阱中的电子和空穴浓度更高。这使得 N-LED B 量子阱中载流子的辐射复合率显著提升,

如图 3(c) 所示, 其辐射复合率在 N-LED A 基础上提升了 32%。N-LED B 高的辐射复合率也与其量子阱中更弱的量子限制斯塔克效应有关。这是因为 N-LED B 量子阱中更高的载流子浓度可以更好地屏蔽阱中的极化电场, 使电子-空穴的波函数重叠度增加, 如图 3(d) 所示。因此, N-LED B 的发光波长蓝移, 且发光强度更强, 如图 3(d) 中的插图所示。

此外, 我们发现氮极性 N-LED B 与具有相同结构的金属极性 Ga-LED C 相比, 具有更高的峰值

发光效率和更低的效率衰减,如图4(a)所示。为了分析形成这种差异的物理机制,我们模拟了这两个 LED 在 30 A/cm^2 电流密度下 EDL 中的电场分布,如图4(b)、(c)所示。由于相反的极化特性,金属极性 EDL 和氮极性 EDL 中的极化电场方向相反。对于氮极性 EDL,其 GaN 层内的极化电场与外延生长方向相反,而 InGaN 层内的极化电场方向与外延生长方向相同,如图4(b)所示。因此,从 n 型 GaN 注入至有源区的电子在氮极性 EDL 的 GaN 层中被加速,而在 InGaN 层中被减速。相反地,金属极性

EDL 的 GaN 层中电子被减速,而在 InGaN 层中电子被加速。电子在经过电子减速层时,电场力对电子做的功可由如下公式计算^[29]:

$$E_{\text{Field}} = -q \int_0^L E(x) dx, \quad (1)$$

其中, $E(x)$ 为 EDL 中的电场强度, q 为电子电荷量, L 为电子减速层长度。计算得到金属极性 Ga-LED C 和氮极性 N-LED B 中 EDL 电场力对注入电子做的功分别为 19.42 meV 和 -10.4 meV 。这说明,氮极性 N-LED B 中的 EDL 对注入电子具有更显著的减速作用。

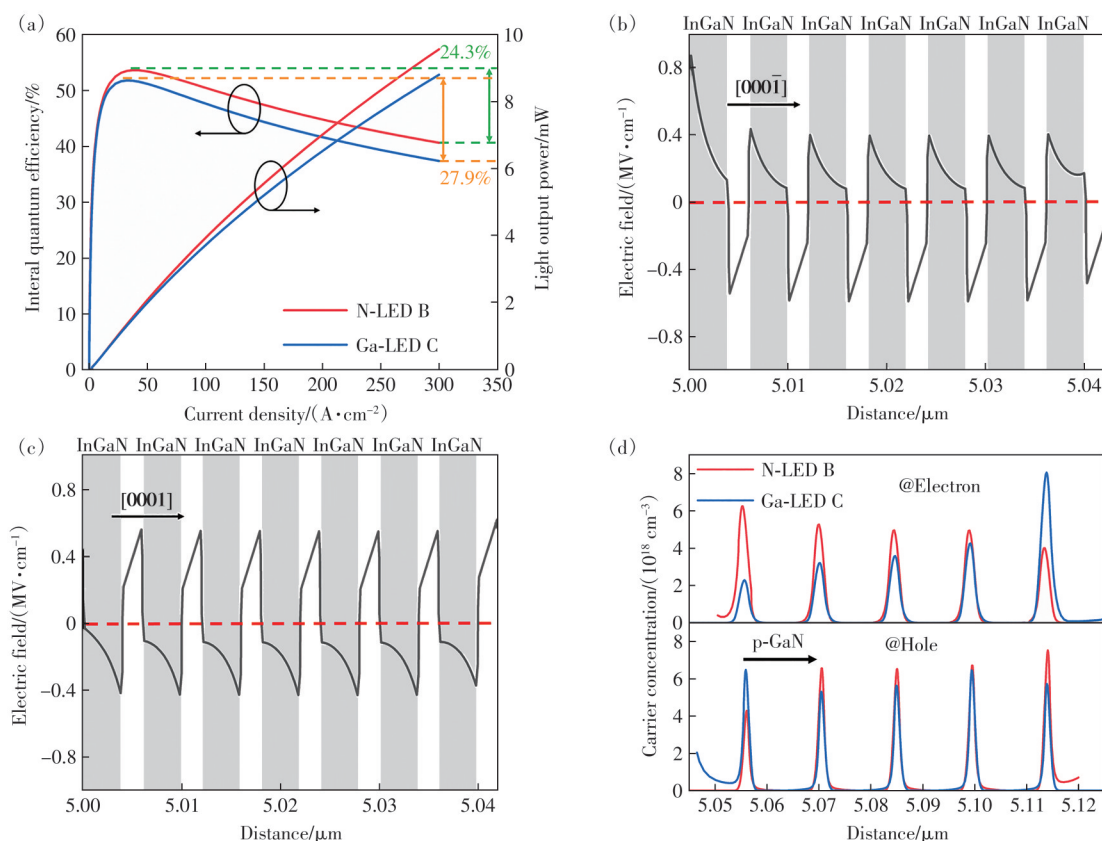


图4 (a)N-LED B和Ga-LED C的IQE与LOP曲线;30 A/cm²电流密度下,(b)N-LED B和(c)Ga-LED C电子减速层处的电子电场;(d)在30 A/cm²电流密度下,N-LED B和Ga-LED C的载流子浓度分布

Fig.4 (a) IQE and LOP of N-LED B and Ga-LED C. Electric field distributions in the EDL region of (b) N-LED B and (c) Ga-LED C. (d) Carrier concentration distributions at 30 A/cm^2

为了验证上述计算结果,我们模拟了在 30 A/cm^2 电流密度下量子阱中载流子浓度分布,如图4(d)所示。可以看到,得益于更强的电子减速效果,氮极性 N-LED B 在靠近 n-GaN 侧的量子阱中积累了更高的电子浓度,进而电子在量子阱中的分布更为均匀。此外,氮极性 N-LED B 量子阱中的空穴浓度也高于金属极性 Ga-LED C,这是因为 N-LED B 具有更低的空穴注入势垒 (217 meV)。因此,在

相同的器件结构下,氮极性 N-LED B 和金属极性 Ga-LED C 相比,具有更好的发光性能。

4 结 论

本文通过数值模拟研究了具有 n-In_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN 超晶格 EDL 但无 p-AlGaIn EBL 结构的氮极性 InGaN 基红光 LED 的电学和光学特性。仿真结果表明,该器件结构可有效提升电子在量子阱中的

分布均匀性,并抑制电子溢出。同时,该器件结构具有较低的空穴注入势垒,其量子阱中能够积累更高的空穴浓度。重要的是,该LED结构中无p-AlGaIn EBL,能够避免p-AlGaIn EBL高生长温度导致的量子阱晶体质量恶化问题,有利于推动高

发光效率InGaIn基红光Micro-LED的制备。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:

[http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/](http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250229)

CJL.20250229

参 考 文 献:

- [1] ROBIN Y, PRISTOVSEK M, AMANO H, *et al.* What is red? On the chromaticity of orange-red InGaIn/GaIn based LEDs [J]. *J. Appl. Phys.*, 2018, 124(18): 183102.
- [2] RYU J E, PARK S, PARK Y, *et al.* Technological breakthroughs in chip fabrication, transfer, and color conversion for high-performance micro-LED displays [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(43): 2204947.
- [3] PARK J, CHOI J H, KONG K, *et al.* Electrically driven mid-submicrometre pixelation of InGaIn micro-light-emitting diode displays for augmented-reality glasses [J]. *Nat. Photonics*, 2021, 15(6): 449-455.
- [4] CHENG A D, HAO Z B, SUN C Z, *et al.* Recent progresses on InGaIn red micro-LEDs for display [J]. *Prog. Quantum Electron.*, 2025, 102: 100575.
- [5] LI Z C, LIU J P, FENG M X, *et al.* Suppression of thermal degradation of InGaIn/GaIn quantum wells in green laser diode structures during the epitaxial growth [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(15): 152109.
- [6] WANG Y C, LIANG F, YANG J, *et al.* Investigation of p-GaIn growth temperature on thermal degradation of green InGaIn/GaIn multiple quantum wells [J]. *J. Alloys Compd.*, 2025, 1042: 184009.
- [7] CHEN Z Y, LIANG F, ZHAO D G, *et al.* Startified thermal degradation in blue InGaIn quantum well structures: P-GaIn growth temperature and its influence on quantum well optical properties [J]. *J. Alloys Compd.*, 2024, 983: 173909.
- [8] WHITE R C, LI H J, KHOURY M, *et al.* InGaIn-based microLED devices approaching 1% EQE with red 609 nm electroluminescence on semi-relaxed substrates [J]. *Crystals*, 2021, 11(11): 1364.
- [9] ZHUANG Z, IIDA D, VELAZQUEZ-RIZO M, *et al.* 606-nm InGaIn amber micro-light-emitting diodes with an on-wafer external quantum efficiency of 0.56% [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2021, 42(7): 1029-1032.
- [10] LAI C H, YANG D K, LIN Z M, *et al.* Impacts of p-AlGaIn electron blocking layer for the performance of low current injected green GaIn-based micro-LEDs [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2024, 71(12): 7563-7568.
- [11] LU S Q, LI J C, HUANG K, *et al.* Designs of InGaIn micro-LED structure for improving quantum efficiency at low current density [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2021, 16(1): 99.
- [12] TZOU A J, LIN D W, YU C R, *et al.* High-performance InGaIn-based green light-emitting diodes with quaternary InAl-GaIn/GaIn superlattice electron blocking layer [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(11): 11387.
- [13] LI P P, LI H J, ZHANG H J, *et al.* Red InGaIn micro-light-emitting diodes (>620 nm) with a peak external quantum efficiency of 4.5% using an epitaxial tunnel junction contact [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 120(12): 121102.
- [14] HUANG Y M, PENG C Y, MIAO W C, *et al.* High-efficiency InGaIn red micro-LEDs for visible light communication [J]. *Photonics Res.*, 2022, 10(8): 1978.
- [15] PARK E, KIM G, KIM W, *et al.* Enhancement of radiative recombination by different indium composition of multiple quantum barriers in GaIn-based light-emitting diodes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2013, 52(6S): 06GE04.
- [16] ZHOU Q X, DU P, SHI L, *et al.* Performance improvement of InGaIn-based red light-emitting diodes *via* ultrathin InN insertion layer [J]. *Photonics*, 2023, 10(6): 647.
- [17] ZHANG Z H, LIU W, TAN S T, *et al.* On the mechanisms of InGaIn electron cooler in InGaIn/GaIn light-emitting diodes [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(S3): A779.
- [18] WANG Q, ZHANG K, LIN D, *et al.* Introducing an n-type electron deceleration layer to enhance the luminous efficiency of AlGaIn-based DUV-LEDs [J]. *Front. Phys.*, 2023, 11: 1118946.
- [19] PARK J Y, LEE J H, JUNG S, *et al.* InGaIn/GaIn-based green-light-emitting diodes with an inserted InGaIn/GaIn-graded superlattice layer [J]. *Phys. Status Solidi (A)*, 2016, 213(6): 1610-1614.
- [20] KELLER S, FICHTENBAUM N A, FURUKAWA M, *et al.* Growth and characterization of N-polar InGaIn/GaIn multiquantum

- wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(19): 191908.
- [21] BALUSHI Z YAL, REDWING J M. The effect of polarity on MOCVD growth of thick InGaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 110(2): 022101.
- [22] WANG Y, WANG Y S, ZHANG L D, *et al.* Performance enhancement of nitrogen-polar GaN-based light-emitting diodes prepared by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Opt. Lett.*, 2022, 47(15): 3628-3631.
- [23] ZHANG Z H, TAN S T, LIU W, *et al.* Improved InGaN/GaN light-emitting diodes with a p-GaN/n-GaN/p-GaN/n-GaN/p-GaN current-spreading layer [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(4): 4958-4969.
- [24] ZHANG Z H, TAN S T, JU Z G, *et al.* On the effect of step-doped quantum barriers in InGaN/GaN light emitting diodes [J]. *J. Disp. Technol.*, 2013, 9(4): 226-233.
- [25] ZHAI D Y, TIAN K K, CHU C S, *et al.* Impact of carrier injection and recombination on the -3 dB bandwidth for GaN-based VCSELs [J]. *Opt. Lett.*, 2025, 50(11): 3720-3723.
- [26] ZHANG Z H, JI Y, LIU W, *et al.* On the origin of the electron blocking effect by an *n*-type AlGaIn electron blocking layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104(7): 073511.
- [27] WEI S H, ZUNGER A. Valence band splittings and band offsets of AlN, GaN, and InN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69(18): 2719-2721.
- [28] VURGATMAN I, MEYER J R. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 94(6): 3675-3696.
- [29] SCHUBERT M F, SCHUBERT E F. Effect of heterointerface polarization charges and well width upon capture and dwell time for electrons and holes above GaInN/GaN quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(13): 131102.



王宗昊(2000-),男,吉林长春人,硕士研究生,2023年于吉林大学获得学士学位,主要从事氮极性氮化物红光LED研究。
E-mail: 1411474504@qq.com



张源涛(1976-),男,吉林长春人,博士,教授,2005年于吉林大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体材料与器件研究。
E-mail: zhangyt@jlu.edu.cn



邓高强(1990-),男,江西抚州人,博士,副教授,2019年于吉林大学获得博士学位,主要从事Ⅲ族氮化物半导体材料的外延生长、物性和器件制备研究。
E-mail: denggq@jlu.edu.cn