

文章编号: 1000-7032(2024)12-2037-08

具有组分渐变量子垒层的氮极性 InGaN 基红光 LED 仿真研究

纪泽婷¹, 邓高强^{1*}, 王昱森¹, 于佳琪¹, 左长财¹, 高浩哲¹,
段彬², 张宝林¹, 张源涛^{1*}

(1. 吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012;

2. 吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 基于 III 族氮化物材料的 Micro LED 显示亟需高性能的 InGaN 基红光 LED。本工作利用极化工程构建了组分渐变 InGaN 作为最后量子垒层 (Last quantum barrier, LQB) 的氮极性 InGaN 基红光 LED。数值模拟研究表明, 氮极性 InGaN 基 LED 中相反的极化电场可有效增强量子阱对载流子的限制能力, 并降低器件开启电压。重要的是, 氮极性 InGaN 基 LED 中, 组分渐变 InGaN LQB 层和 p-GaN 界面处会同时形成电子和空穴势阱, 从而形成高效的辐射发光, 进而有效提升 InGaN 基红光 LED 的发光性能。本工作为高效 InGaN 基红光 LED 结构设计和器件制备提供了新思路。

关键词: InGaN; 极化工程; 红光 LED

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240299

Simulation on Nitrogen-polar InGaN-based Red Light-emitting Diodes with Compositionally Graded Quantum Barrier Layer

Ji Zeting¹, Deng Gaoqiang^{1*}, Wang Yusen¹, Yu Jiaqi¹, Zuo Changcai¹, Gao Haozhe¹,
Duan Bin², Zhang Baolin¹, Zhang Yuantao^{1*}

(1. State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,

Jilin University, Changchun 130012, China;

2. College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

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

Abstract: High-performance InGaN-based red LEDs are urgently required for Micro LED displays based on III-nitride materials. In this work, we use polarization engineering to construct a nitrogen-polar (N-polar) InGaN-based red LED with a compositionally graded InGaN layer as the last quantum barrier (LQB) layer. The numerical simulation results show that the opposite polarization electric field in N-polar nitride materials effectively enhances the confinement of carriers in the quantum well and reduces the turn-on voltage of device. Importantly, the interface between the compositionally graded InGaN LQB and p-GaN simultaneously forms electron and hole potential wells, enabling efficient radiative recombination and thus significantly improving the luminous performance of InGaN-based red LEDs. This work provides a new approach for the design and fabrication of efficient InGaN-based red LEDs.

Key words: InGaN; polarization engineering; red light-emitting diodes

收稿日期: 2024-11-14; 修订日期: 2024-11-21

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3605205, 2021YFB3601000, 2021YFB3601002); 国家自然科学基金 (U22A20134, 62104078, 62074069, 62474080, 62104079); 吉林省科技发展计划 (20220201065GX, ***202402002, 20230101053JC, 20220101119JC)
Supported by the National Key R&D Program of China (2022YFB3605205, 2021YFB3601000, 2021YFB3601002); National Natural Science Foundation of China (U22A20134, 62104078, 62074069, 62474080, 62104079); Science and Technology Developing Project of Jilin Province (20220201065GX, ***202402002, 20230101053JC, 20220101119JC)

1 引 言

Micro LED 显示技术具有高分辨率、高亮度、低能耗和持久耐用等优势^[1],在增强现实/虚拟现实、可见光通信、可穿戴器件、空间成像等领域具有广阔应用前景^[2-3]。目前, Micro LED 显示技术面临的挑战之一是缺乏高效且可靠的红光微型芯片^[4]。InGaN 是制备 Micro LED 显示技术所需红光微型芯片的理想材料,与被广泛研究的 AlGaInP 材料($\sim 10 \mu\text{m}$)相比,其载流子扩散长度更短($\sim 100 \text{ nm}$),器件尺寸对 LED 性能的影响较小^[5]。同时,它具有较好的机械稳定性且易于与 InGaN 基蓝光和绿光 LED 实现工艺兼容^[6-7],可简化 Micro LED 显示技术的产业化制作工艺。

然而,目前 InGaN 基红光 LED 的发光效率相对较低,功率转换效率大多在 10% 以下^[8-9]。为提高 InGaN 基红光 LED 的发光效率,研究人员提出了多种应力调控的方法。应力调控方法的目的是通过降低量子阱中的压应力,来减弱量子阱内的极化电场,从而缓解量子限制斯塔克效应(QCSE),提高载流子的辐射复合效率^[10]。具体的实现方式包括在量子阱中引入薄的 AlGaIn 或 AlN 盖层^[11-12];在生长量子阱之前引入高 In 组分 InGaIn 分解层^[13-14];以磁控溅射 AlN 和 MOCVD 低温 GaN 作为复合缓冲层^[7];采用不同发光波长的混阱结构并在量子阱中引入 V 型坑结构^[15];在由 SiC 衬底热分解生成的石墨烯上生长应变弛豫的 GaN^[16]。此外,也有在 LED 结构中引入隧道结以增强电流扩展能力,从而减少红光 LED 的光学损耗,提高其发光性能^[17]。除了上述方法外,鲜少有研究关注

如何利用氮化物材料固有的极化特性来提高 InGaN 基红光 LED 的发光效率,尽管类似的策略已被成功应用于提高 AlGaIn 基紫外 LED 的发光效率^[18-19]。

本工作提出了一种基于极化工程的 InGaN 基红光 LED 器件结构。该 LED 由氮极性氮化物材料构成,其内部极化电场方向与被广泛研究的金属极性氮化物 LED 相反。重要的是,该 LED 结构中采用了组分渐变的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0.22 \rightarrow 0.42$) 作为最后量子垒(LQB)层。我们的模拟结果表明,在氮极性 LED 中,组分渐变 InGaIn 势垒层和 p-GaN 空穴提供层界面会同时形成电子势阱和空穴势阱,能够产生高效的辐射发光,从而有效提升红光 LED 发光效率。本工作将有利于推动氮极性氮化物材料和高效红光 LED 的研发。

2 实 验

本工作中,我们采用 Crosslight 公司 Advanced Physical Models of Semiconductor Devices (APSYS) 软件对 InGaN 基红光 LED 进行了二维的器件模拟。模拟中构建的器件结构如图 1(a) 所示。其由 $5 \mu\text{m}$ 厚的 n-GaN 层(掺杂 Si, 浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、5 对 $\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N}$ (3 nm)/ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ (12 nm) 多量子阱、80 nm 的 p-GaN 空穴提供层(掺杂 Mg, 浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)以及 20 nm 的 p^+ -GaN(掺杂 Mg, 浓度为 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)欧姆接触层构成。基于上述结构,通过改变 LED 材料的极性和 LQB 层的结构,我们设计了 4 个 LED 器件,分别命名为 Ga-LED、N-LED、N-GLQB-LED 和 Ga-GLQB-LED。其中, Ga-LED 和 Ga-GLQB-LED 结构由金属极性氮化物

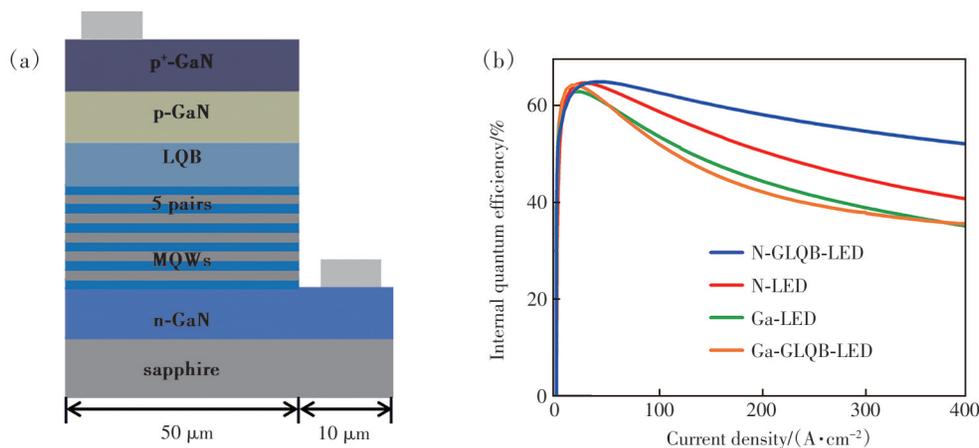


图 1 (a)模拟中采用的 LED 结构示意图;(b)模拟得到的 N-GLQB-LED、N-LED、Ga-LED 和 Ga-GLQB-LED 的 IQE 曲线
Fig.1 (a) Schematic diagram of the LED structure adopted in our simulation. (b) Simulated IQE curves of N-GLQB-LED, N-LED, Ga-LED and Ga-GLQB-LED.

材料构成, N-LED 和 N-GLQB-LED 结构由氮极性氮化物材料构成。此外, Ga-LED 和 N-LED 的 LQB 为 12 nm 厚的固定组分 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$, 而 Ga-GLQB-LED 和 N-GLQB-LED 的 LQB 则设计为 12 nm 厚的组分渐变 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0.22 \rightarrow 0.42$), 其中, In 组分沿生长方向从 0.22 渐变到 0.42。

在我们的模拟设置中, Shockley-Read-Hall (SRH) 复合寿命为 $10 \text{ ns}^{[20]}$, 俄歇系数为 $1 \times 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}^{[21]}$ 。此外, InGaN/GaN 异质结导带和价带带阶比设定为 0.7/0.3^[22]。考虑到位错、缺陷和其他界面电荷对极化电荷的屏蔽效应, 我们设定极化屏蔽因子为 0.4^[20]。其他材料参数可参见相关文献^[23]。

3 结果与讨论

为了评估这 4 个 LED 器件的发光性能, 我们模拟了内量子效率 (IQE) 随驱动电流密度的变化曲线, 如图 1(b) 所示。对于金属极性的 Ga-LED 和 Ga-GLQB-LED, 它们的 IQE 达到峰值以后, 均随电流密度的增加快速下降。而基于氮极性氮化物材料的 N-LED, 其效率下降有所缓解。重要的是, 采用组分渐变 InGaN 作为 LQB 层的 N-GLQB-

LED, 其效率下降明显降低。因此, 模拟结果表明, 在氮极性 LED 器件结构基础上, 引入组分渐变 InGaN 的 LQB 层可有效提升 InGaN 基红光 LED 的发光性能。进一步, 我们基于 ABC 模型对 LED 内量子效率随电流密度增加而衰减的原因进行了分析。由 ABC 模型可知, LED 的 IQE 值 η 可表示为^[24]:

$$\eta = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3}, \quad (1)$$

其中, n 为载流子浓度, A 、 B 、 C 分别为 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合系数、辐射复合系数和俄歇复合系数, An 、 Bn^2 、 Cn^3 分别为 SRH 复合率、辐射复合率和俄歇复合率。图 2(a)、(b) 分别为 N-LED 在峰值 IQE 电流密度 30 A/cm^2 及 180 A/cm^2 电流密度下量子阱有源区中各类型复合率的占比。可以看到, N-LED 的辐射复合率占比从峰值电流密度 30 A/cm^2 下的 65.0% 降低至 180 A/cm^2 电流密度下的 49.6%。于此同时, 俄歇复合率的占比从 14.9% 增加为 41.3%。因此, LED 器件 IQE 随电流密度增加而衰减的原因与高电流密度下俄歇复合率的快速增加有关。图 2(c) 为各 LED 在 180 A/cm^2 电流密度下 SRH 复合率、辐射复合率和俄歇复合率的占

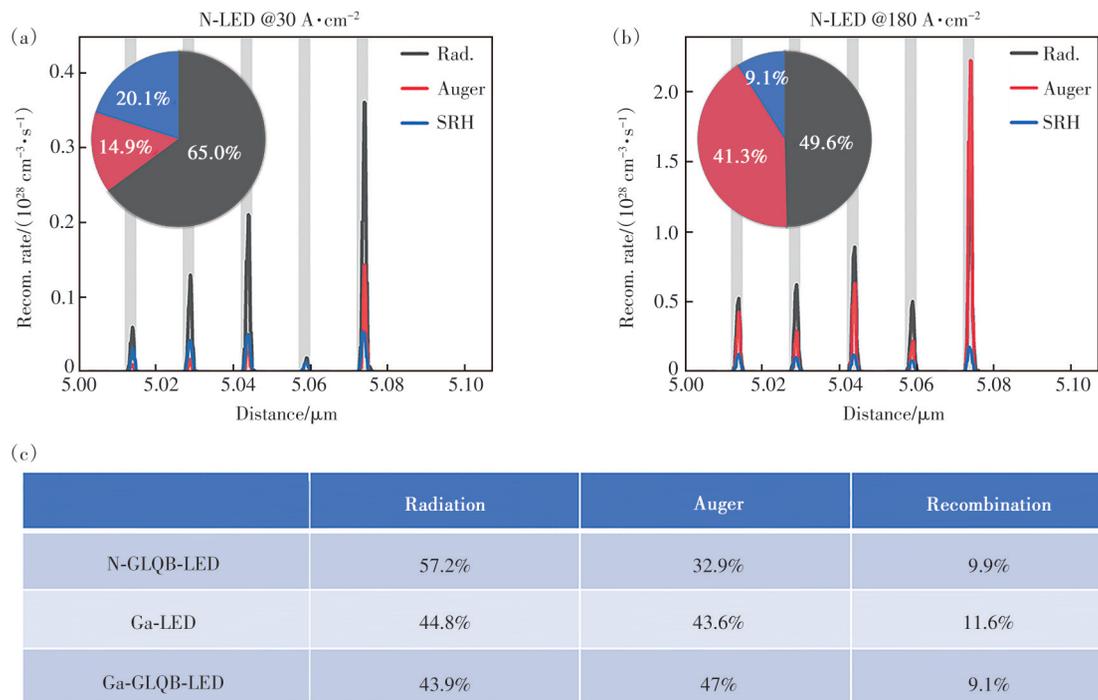


图 2 N-LED 在 30 A/cm^2 电流密度下 (a) 及 180 A/cm^2 电流密度下 (b) 量子阱有源区中各类型复合率的占比; (c) N-GLQB-LED、Ga-LED 和 Ga-GLQB-LED 在 180 A/cm^2 电流密度下各类型复合率的占比

Fig.2 The proportions of each type of recombination rate in the quantum wells of N-LED at current density of 30 A/cm^2 (a) and 180 A/cm^2 (b). (c) The proportion of each type of recombination rate of N-GLQB-LED, Ga-LED and Ga-GLQB-LED at current density of 180 A/cm^2

比。在该电流密度下, N-GLQB-LED 的辐射复合率占比最高, 而 Ga-GLQB-LED 的占比最低, 这与图 1(b) 的结果相符。

为了探究这 4 个 LED 器件发光性能存在差异的原因, 我们模拟了 LED 在 180 A/cm^2 电流密度下的能带图, 如图 3 所示。对比图 3(a)、(b) 可以发现, Ga-LED 和 N-LED 多量子阱中的能带倾斜是相反的, 这是因为这两种极性 LED 具有相反的极化电场。相反的极化电场使得 N-LED 量子阱对载

流子具有更强的限制作用。其量子阱限制电子溢出的势垒为 565 meV , 较 Ga-LED 量子阱高出 205 meV 。同时, N-LED 具有更高的电子阻挡势垒 (1.2 eV), 能够有效抑制电子从量子阱有源区溢出到 p-GaN 层。此外, N-LED 还具有更低的空穴注入势垒 (139 meV), 为 Ga-LED 的近 $1/3$, 这有助于空穴从 p-GaN 侧注入量子阱有源区。可推知, 在相同的电流密度下, N-LED 量子阱比 Ga-LED 具有更高浓度的空穴。

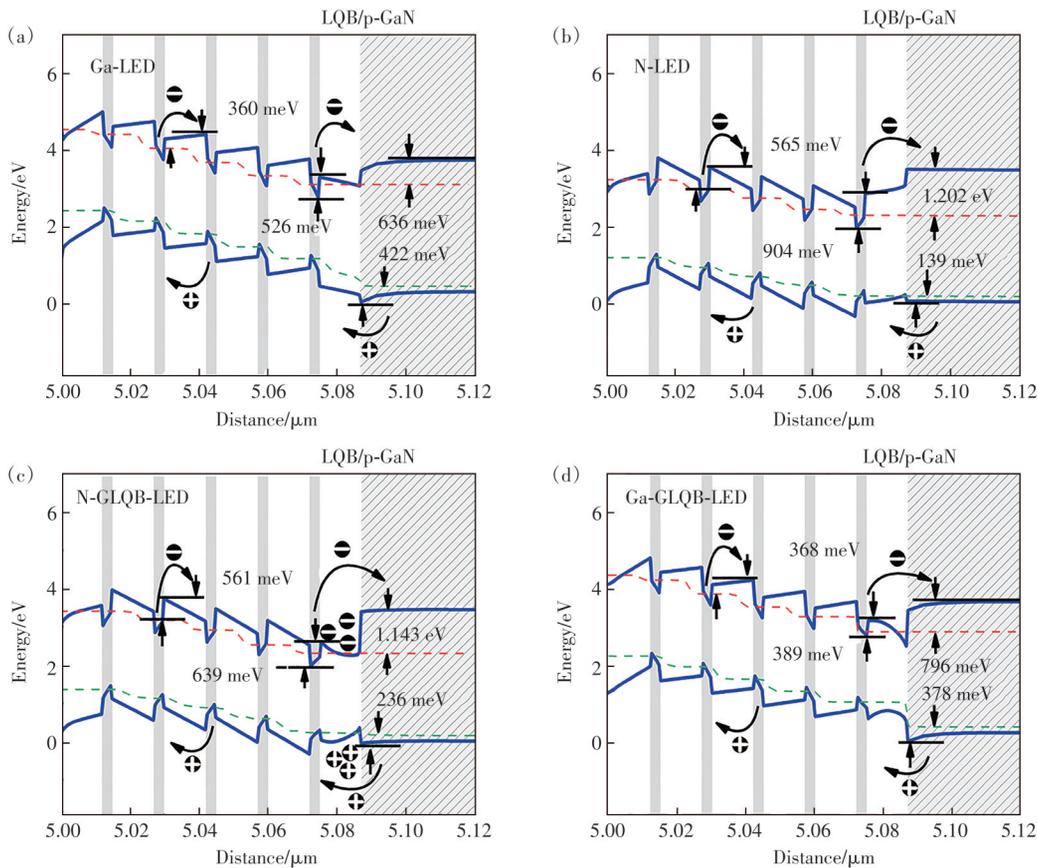


图 3 Ga-LED(a)、N-LED(b)、N-GLQB-LED(c)、Ga-GLQB-LED(d)在电流密度为 180 A/cm^2 时的能带图

Fig.3 Energy band diagrams of Ga-LED (a), N-LED (b), N-GLQB-LED (c), and Ga-GLQB-LED (d) at current density of 180 A/cm^2

对于 N-GLQB-LED, 其最后量子垒层被调整为组分渐变 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0.22 \rightarrow 0.42$)。从图 3(c) 所示的能带图上看, 组分渐变 InGa_xN 层和 p-GaN 空穴提供层界面会同时形成电子势阱和空穴势阱。因此, 在正向偏压驱动下, 电子和空穴能够同时被限制在组分渐变 InGa_xN/p-GaN 界面势阱中, 将能在界面处形成有效的辐射发光。值得注意的是, 在 Ga-LED 基础上, 把最后量子垒层调整为组分渐变 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0.22 \rightarrow 0.42$) 的 Ga-GLQB-LED, 其组分渐变 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层和 p-GaN 界

面处只能形成较深的电子势阱, 而不能形成空穴势阱, 如果 3(d) 所示。

为了验证我们基于能带结构的载流子输运特性分析结果, 我们模拟了 180 A/cm^2 电流密度下这 4 个 LED 量子阱中的载流子浓度分布, 如图 4(a)、(b) 所示。相比于 Ga-LED, N-LED 在有源区域之外的 LQB/p-GaN 界面处没有电子积累, 表明 N-LED 的电子限制能力比 Ga-LED 强。同时, N-LED 的量子阱中的空穴浓度总体上高于 Ga-LED, 如图 4(a) 所示, 这与我们之前的分析相一

致。N-LED 量子阱更强的载流子限制能力和更高的空穴浓度使其具有更高的辐射复合率,如图 4(c)所示。因此,在 180 A/cm^2 电流密度下,氮极性氮化物材料构建的 N-LED 比金属极性氮化物材料构建的 GaN-LED 具有更低的效率衰减,如图 1(b)所示。此外,对于用氮极性氮化物材料构建

的 N-GLQB-LED,电子和空穴在 LQB/p-GaN 界面同时积累,如图 4(b)所示。在该界面处积聚的电子和空穴形成了有效的辐射发光,如图 4(d)所示。因此,在 180 A/cm^2 电流密度下,N-GLQB-LED 比 N-LED 具有更高的发光效率,如图 1(b)所示。

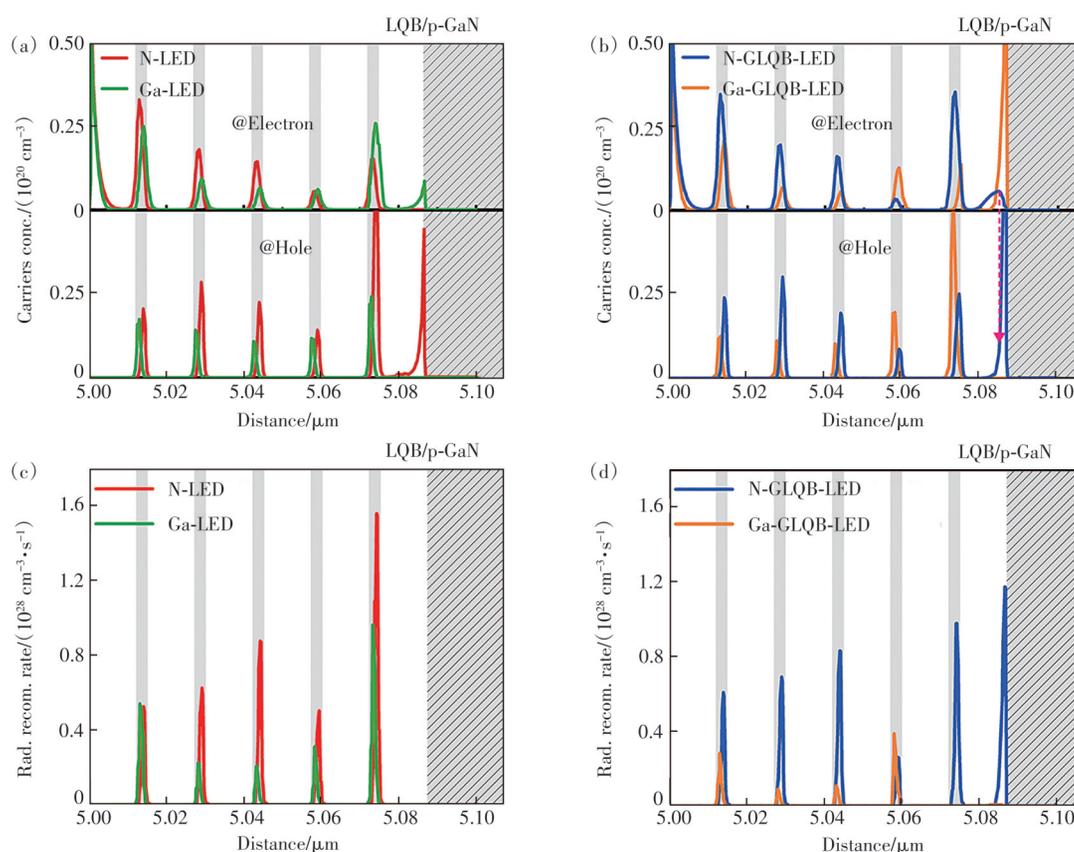


图 4 电流密度为 180 A/cm^2 时 MQW 周围的电子和空穴浓度分布曲线:(a)N-LED 和 Ga-LED,(b)N-GLQB-LED 和 Ga-GLQB-LED;电流密度为 180 A/cm^2 时 MQW 的辐射复合率:(c)N-LED 和 Ga-LED,(d)N-GLQB-LED 和 Ga-GLQB-LED

Fig.4 Electron and hole concentration distribution profiles around the MQWs at current density of 180 A/cm^2 : (a)N-LED and Ga-LED, (b)N-GLQB-LED and Ga-GLQB-LED. Radiative recombination rate in the MQWs at current density of 180 A/cm^2 : (c)N-LED and Ga-LED, (d)N-GLQB-LED and Ga-GLQB-LED

不同的是,基于金属极性氮化物材料构建的 Ga-GLQB-LED,其组分渐变 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层和 p-GaN 层界面处只有电子积累,而没有空穴积累,如图 4(b)所示。这是因为组分渐变 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层和 p-GaN 界面处只形成了较深的电子势阱,而没有形成空穴势阱,如图 3(d)所示。这与我们之前基于能带的分析结果也相符。因此,Ga-GLQB-LED 中组分渐变 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层和 p-GaN 界面处不能形成有效的辐射发光,如图 4(d)所示。这也是 Ga-GLQB-LED 的发光效率没有在 Ga-LED 基础上提升的原因,如图 1(b)所示。

此外,我们分析了 LQB/p-GaN 界面上电子和

空穴势阱形成的物理机制。对于 InGaN 基的异质结,由于 InN 的自发极化与 GaN 的自发极化接近,因此异质结界面极化电荷以压电极化为主^[25]。图 5(a)为热平衡下 N-GLQB-LED LQB 附近的能带图。各外延层中的自发极化(P_{SP})和压电极化(P_{PE})方向用黑色箭头进行了标记。通常,MQW 是共格生长于 GaN 模板之上^[26]。因此,MQW 处于压应变状态,并且 In 含量越高,压应变越强,即 MQW 中的压电极化更强。值得注意的是,压应变诱导的压电极化与自发极化相反。可推知,在 $\text{In}_{0.42}\text{Ga}_{0.58}\text{N/LQB}(-\sigma_{\text{N1}})$ 和 $\text{LQB/p-GaN}(-\sigma_{\text{N2}})$ 界面会形成净的负极化电荷。重要的是,组分渐变

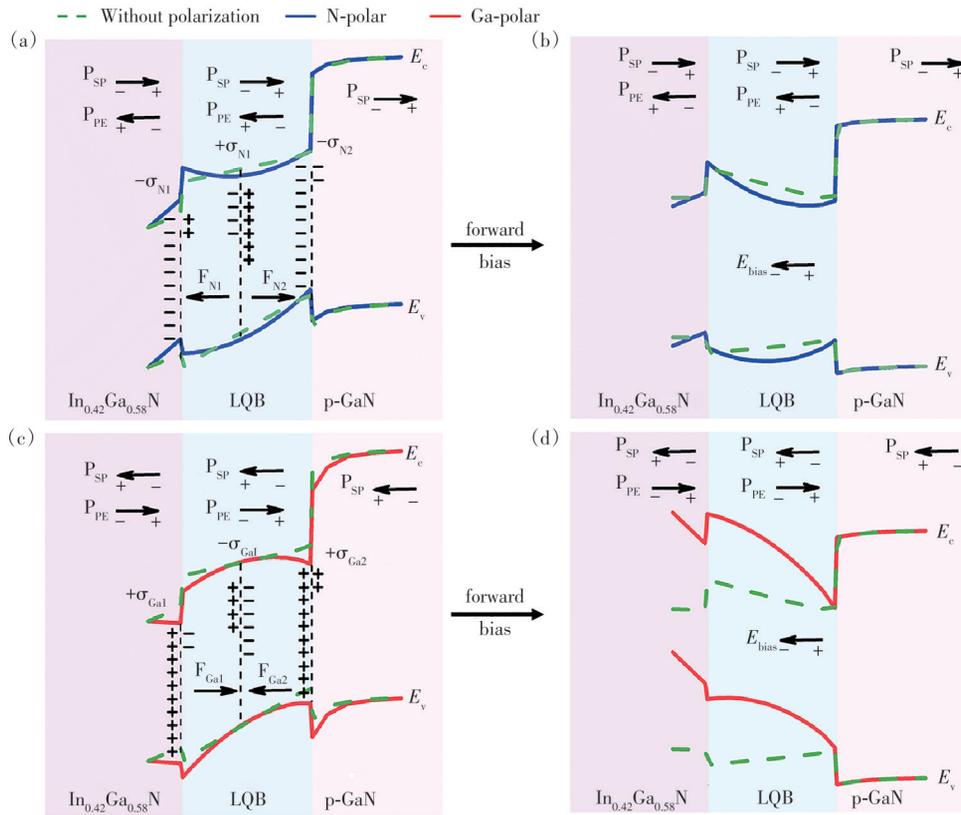


图 5 热平衡(a)和正向偏压(b)下 N-GLQB-LED 在 LQB 附近的能带图;热平衡(c)和正向偏压(d)下 Ga-GLQB-LED 在 LQB 附近的能带图。图中的绿色虚线是相应的不考虑极化时的能带图

Fig.5 Energy band diagrams around the LQB for the N-GLQB-LED under thermal equilibrium (a) and forward bias (b). Energy band diagrams around the LQB for the Ga-GLQB-LED under thermal equilibrium (c) and forward bias (d). The green dotted lines in each panel are the corresponding energy band diagrams without polarization

InGaN 可以被看作是由无数异质界面组成的^[18],并且在每个界面上形成净的正极化电荷 ($+\sigma_{N1}$)。因此,组分渐变 LQB 中会形成方向相反的极化电场 (F_{N1} 和 F_{N2}),如图 5(a)所示,这导致 LQB 的导带下凹。进而,在正向偏压作用下,LQB/p-GaN 界面处可以形成电子势阱和空穴势阱,如图 5(b)所示。同理,Ga-GLQB-LED 中 LQB 的导带是

上凸的,如图 5(c)所示,这是因为其极化电场方向与 N-GLQB-LED 相反。因此,在正向偏压作用下,其 LQB/p-GaN 界面处只形成电子势阱而不形成空穴势阱,如图 5(d)所示。

我们进一步模拟了上述 4 个 LED 在 180 A/cm^2 下的电致发光谱,如图 6(a)所示,可以看到 LED 的发光波长均在 620 nm 附近,其中氮极性 LED 的

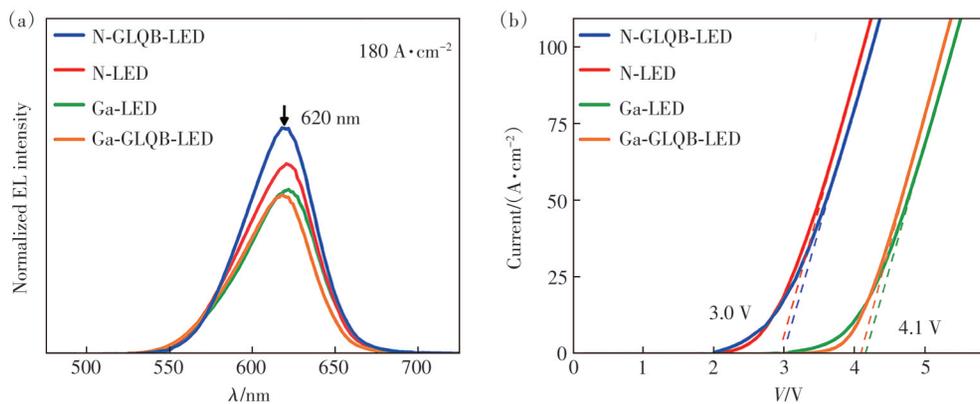


图 6 N-GLQB-LED、N-LED、Ga-LED 和 Ga-GLQB-LED 的电致发光谱(a)和 I-V 曲线(b)

Fig.6 Simulated EL spectra (a) and I-V curves (b) of N-GLQB-LED, N-LED, Ga-LED and Ga-GLQB-LED

发光强度强于金属极性 LED, 并且 N-GLQB-LED 的发光强度要高于 N-LED 的发光强度。我们的模拟结果表明, 氮极性氮化物材料在提高 InGaN 基红光 LED 内量子效率方面具有潜力。另外, 值得注意的是, 氮极性 InGaN 基 LED 还具有更低的开启电压, 如图 6(b) 所示, 这与文献中的报道结果一致^[27-28]。这对器件来说比较重要, 因为低的工作电压有利于提升器件的功率转换效率。

4 结 论

本文基于极化工程提出了一种提升 InGaN 基

红光 LED 发光性能的可行方法。该方法采用氮极性氮化物材料来增强量子阱对载流子的限制能力, 并通过组分渐变 InGaN LQB 的引入在 p-GaN 界面处形成额外的量子阱。积累在该量子阱中的电子和空穴具有较高的辐射复合率。与相同结构的金属极性 LED (Ga-GLQB-LED) 相比, 氮极性 LED (N-GLQB-LED) 的发光性能得到有效提升。

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/CJL.20240299>

参 考 文 献:

- [1] ZHANG S H, ZHENG H, ZHOU L, *et al.* Research progress of micro-LED display technology [J]. *Crystals*, 2023, 13(7): 1001.
- [2] AZEEM W, 刘召军, 伏桂月. 基于 III 族氮化物的 Micro-LED 挑战及潜在解决方案 [J]. *液晶与显示*, 2023, 38(7): 892-909.
 AZEEM W, LIU Z J, FU G Y. Challenges and potential solutions of III -nitride based Micro-LEDs [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2023, 38(7): 892-909. (in English)
- [3] 周律, 郑华, 张声浩, 等. Micro-LED 显示及其驱动技术的研究进展 [J]. *液晶与显示*, 2022, 37(11): 1395-1410.
 ZHOU L, ZHENG H, ZHANG S H, *et al.* Research progress of Micro-LED display and its driving technology [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2022, 37(11): 1395-1410. (in Chinese)
- [4] WANG Z, ZHU S J, SHAN X Y, *et al.* Red, green and blue InGaN Micro-LEDs for display application: temperature and current density effects [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(20): 36403-36413.
- [5] ROBIN Y, PRISTOVSEK M, AMANO H, *et al.* What is red? On the chromaticity of orange-red InGaN/GaN based LEDs [J]. *J. Appl. Phys.*, 2018, 124(18): 183102.
- [6] LI P P, DAVID A, LI H J, *et al.* High-temperature electroluminescence properties of InGaN red $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ micro-light-emitting diodes with a peak external quantum efficiency of 3.2% [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 119(23): 231101.
- [7] CHEN Z Y, SHENG B W, LIU F, *et al.* High-efficiency InGaN red mini-LEDs on sapphire toward full-color nitride displays: effect of strain modulation [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33: 2300042.
- [8] PANDEY A, XIAO Y X, REDDEPPA M, *et al.* A red-emitting micrometer scale LED with external quantum efficiency > 8% [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 122(15): 151103.
- [9] HU J W, XING K, XIA Z H, *et al.* Wafer-scale emission uniformity of InGaN-based red light-emitting diodes on an *in situ* InGaN decomposition template [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 123(11): 111107.
- [10] VAITKEVIČIUS A, MICKEVIČIUS J, DOBROVOLSKAS D, *et al.* Influence of quantum-confined Stark effect on optical properties within trench defects in InGaN quantum wells with different indium content [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, 115(21): 213512.
- [11] LEE D G, CHOI Y, JUNG S, *et al.* High-efficiency InGaN red light-emitting diodes with external quantum efficiency of 10.5% using extended quantum well structure with AlGaIn interlayers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(12): 121109.
- [12] LIU Z Y, NONG M T, LU Y, *et al.* Effect of the AlN strain compensation layer on InGaN quantum well red-light-emitting diodes beyond epitaxy [J]. *Opt. Lett.*, 2022, 47(23): 6229-6232.
- [13] CHAN P, DENBAARS S P, NAKAMURA S. Growth of highly relaxed InGaN pseudo-substrates over full 2-in. wafers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 119(13): 131106.
- [14] SMALC-KOZIOROWSKA J, GRZANKA E, LACHOWSKI A, *et al.* Role of metal vacancies in the mechanism of thermal degradation of InGaN quantum wells [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(6): 7476-7484.
- [15] ZHANG S N, ZHANG J L, GAO J D, *et al.* Efficient emission of InGaN-based light-emitting diodes: toward orange and

- red [J]. *Photonics Res.*, 2020, 8(11): 1671-1675.
- [16] YU Y, WANG T, CHEN X F, *et al.* Demonstration of epitaxial growth of strain-relaxed GaN films on graphene/SiC substrates for long wavelength light-emitting diodes [J]. *Light Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 117.
- [17] LI P P, LI H J, ZHANG H J, *et al.* Red InGaN 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.
- [18] SIMON J, PROTASENKO V, LIAN C X, *et al.* Polarization-induced hole doping in wide-band-gap uniaxial semiconductor heterostructures [J]. *Science*, 2010, 327(5961): 60-64.
- [19] HE L F, ZHAO W, ZHANG K, *et al.* Performance enhancement of AlGaIn-based 365 nm ultraviolet light-emitting diodes with a band-engineering last quantum barrier [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(3): 515-518.
- [20] TZOU A J, LIN D W, YU C R, *et al.* High-performance InGaIn-based green light-emitting diodes with quaternary InAlGaIn/GaN superlattice electron blocking layer [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(11): 11387-11395.
- [21] 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.
- [22] WEIS H, ZUNGER A. Valence band splittings and band offsets of AlN, GaN, and InN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69(18): 2719-2721.
- [23] VURGAFTMAN I, MEYER J R. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 94(6): 3675-3696.
- [24] KARPOV S. ABC-model for interpretation of internal quantum efficiency and its droop in III-nitride LEDs: a review [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2015, 47(6): 1293-1303.
- [25] ZHANG K X, SUMIYA M, LIAO M Y, *et al.* P-channel InGaIn/GaN heterostructure metal-oxide-semiconductor field effect transistor based on polarization-induced two-dimensional hole gas [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 23683.
- [26] WANG Y, DUAN B, DENG G Q, *et al.* The study of properties of blue-green InGaIn/GaN multiple quantum wells grown at different pressures [J]. *Superlattices Microstruct.*, 2021, 153: 106863.
- [27] LI Y F, JIANG Y, JIA H Q, *et al.* Superior optoelectronic performance of N-polar GaIn LED to Ga-polar counterpart in the "green gap" range [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 95565-95570.
- [28] USMAN M, MUSHTAQ U, MUNSIF M, *et al.* Enhancement of the optoelectronic performance of p-down multiquantum well N-GaN light-emitting diodes [J]. *Phys. Scr.*, 2019, 94(10): 105808.



纪泽婷(2000-),女,河南安阳人,硕士研究生,2022年于吉林大学获得学士学位,主要从事氮极性红光LED研究。
E-mail: 2508092856@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