

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-08

具有隧道结的镓极性 GaN 基倒置 LED 仿真研究

赵 通, 左长财, 赵敬凯, 高浩哲, 刘宇亮, 郎镇嵩,
邓高强, 杨天鹏*, 张源涛*

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

摘要: 当前, 传统 GaN LED 的性能提升遇到了诸多瓶颈, 例如效率下降、p 型 GaN 接触性差等问题。本工作提出了一种 p 型层在下, n 型层在上的具有隧道结 (Tunnel Junction, TJ) 的镓极性 GaN 基倒置 LED 结构 (TJ-Inversion LED)。与传统镓极性 GaN LED 相比, TJ-Inversion LED 的光输出功率提升了 64%, 内量子效率最大为 67.8%, 在 400 A/cm² 下 droop 效应仅下降 5.6%。模拟研究表明, TJ-Inversion LED 通过改变电流流向使外加电场与极化场方向反向, 降低了量子阱的电场, 提高了电子空穴波函数重叠度和辐射复合率, 有效缓解由强极化场导致的效率下降问题。本工作为高性能 GaN 基 LED 的设计提供了新思路。

关 键 词: GaN; 镓极性; 倒置 LED; 隧道结

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10.3724/CJL.20260267

CSTR: 32170.14.CJL.20260267

Simulation Study of Ga-polar GaN based Inverted LED with Tunnel Junction

ZHAO Tong, ZUO Changcai, ZHAO Jingkai, GAO Haozhe, LIU Yuliang, LANG Zhensong,
DENG Gaoqiang, YANG Tianpeng*, ZHANG Yuantao*

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

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

Abstract: Currently, the performance improvement of conventional GaN LED faces several bottlenecks, such as efficiency droop and poor p-type GaN contact. This work proposes a Ga-polar GaN-based inverted LED structure with tunnel junction (TJ-Inversion LED), where the p-type layer is placed below the n-type layer. Compared with conventional Ga-polar GaN LED, the TJ-Inversion LED shows a 64% increase in light output power, a maximum internal quantum efficiency of 67.8%, and only a 5.6% reduction in droop effect at 400 A/cm². Simulation results indicate that by reversing the current flow direction, the TJ-Inversion LED makes the applied electric field opposite to the polarization field, thereby reducing the electric field in the quantum wells, enhancing the electron-hole wavefunction overlap and the radiative recombination rate, as well as effectively alleviating the efficiency droop caused by strong polarization fields. This work provides a new approach for the design of high-performance GaN-based LEDs.

Keywords: GaN; Ga-polar; inversion LED; tunnel junction

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家科技重大专项 (2025ZD0615800); 国家自然科学基金 (U22A20134, U24A20300, 62474080, 62674094); 吉林省科技发展计划项目 (SKL202402002)

Supported by Advanced Materials-National Science and Technology Major Project (2025ZD0615800); National Natural Science Foundation of China (U22A20134, U24A20300, 62474080, 62674094); Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province (SKL202402002)

1 引 言

氮化镓发光二极管(GaN LED)凭借其高效率、长寿命等优势,成为固态照明领域的核心器件^[1-3]。传统镓极性 GaN 基 LED(Ga-polar LED)是目前应用最广泛的结构,其优势在于外延生长工艺成熟、缺陷密度相对较低^[4-5],但 Ga-polar LED 的极化电场与内建电场方向相同,导致量子阱能带倾斜加剧,电子与空穴波函数空间分离,产生显著的量子限制斯塔克效应(QCSE),大幅降低辐射复合率^[6-7];其次,由于量子阱区域载流子不平衡,电子易越过电子阻挡层(EBL)溢出,产生非辐射复合,加剧效率衰减(droop)现象^[8-9]。与之相比,氮极性 GaN 基 LED(N-polar LED)的优势在于极化电场与内建电场方向相反,可有效抵消内建电场作用,显著减弱 QCSE 效应^[10-11]。然而,N-polar LED 在生长过程中易引入大量缺陷,导致材料质量下降^[12-13]。此外,N-polar LED 的 p 型层掺杂和电极接触工艺难度大,制约了其性能提升^[14]。倒置 LED

(Inversion LED)采用“p 型层在下,n 型层在上”的结构设计,通过改变电流流向减弱 QCSE 效应,将镓极性上晶体质量更佳的优势与氮极性极化电场相反的优势结合,有利于提升 LED 的性能^[15]。

但是 Inversion LED 底部的 p-GaN 在后续生长量子阱和 n-GaN 的过程中,Mg 受主容易发生扩散和钝化,导致 p 型层质量退化^[16],这对于制备 p 型电极十分不利。已有实验证实,引入隧道结(TJ)可以使刻蚀终止于 n 型层,利用低电阻率的 n 型 GaN 代替高电阻率的 p 型 GaN 作为接触层,降低器件串联电阻和接触电阻^[17],以此削弱底部 p-GaN 带来的不利影响。隧道结是一种重掺杂的 p^+-n^+ 结,在反向偏置下,电子可通过带间隧穿从 p^+ 区价带隧穿到 n^+ 区导带,实现空穴的高效注入^[18]。将隧道结引入倒置 LED 中,也可以进一步降低空穴注入势垒,改善载流子平衡,抑制电子溢出,缓解效率衰减^[19]。相关文献多从实验角度探究隧道结倒置 LED 的发光性能,侧重于宏观表征,对于该结构的物理机制解释较为匮乏。

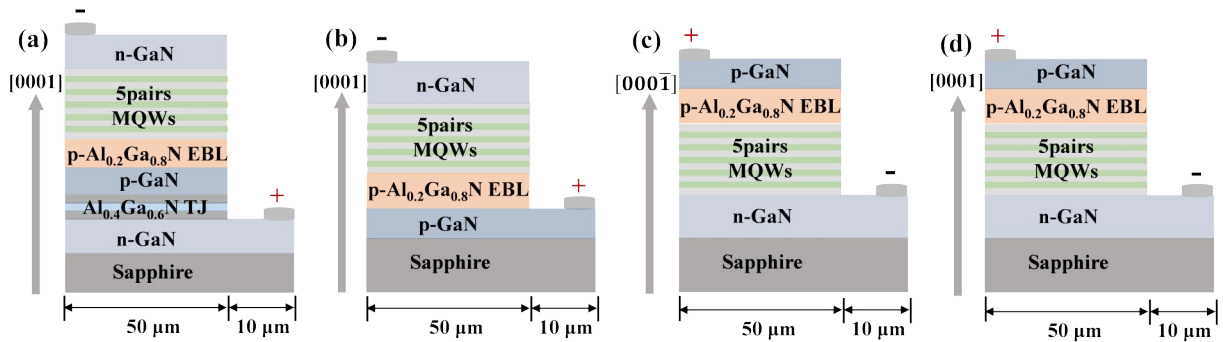


图1 模拟采用的(a)TJ-Inversion LED(b)Inversion LED(c)N-polar LED(d)Ga-polar LED结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of structure of (a) TJ-Inversion LED (b) Inversion LED (c) N-polar LED (d) Ga-polar LED

基于此,本工作开展了具有隧道结的镓极性 GaN 基倒置 LED(TJ-Inversion LED)的仿真研究,系统对比了 TJ-Inversion LED、Inversion LED 与传统 Ga-polar LED、N-polar LED 的光电特性,进一步说明 TJ-Inversion LED 的物理机制。研究表明,TJ-Inversion LED 通过引入隧道结反转 p、n 层序列,在保持高电子阻挡能力的同时,实现了弱量子阱电场,使电子-空穴波函数重叠度与辐射复合率最大化,其在 400 A/cm^2 高电流密度下仍维持约 64% 的内量子效率及达到 41.8 mW 的光输出功率。该结构为抑制 GaN 基 LED 的效率衰减、提升高功率工作下的光电转换效率提供了有效的途径。

2 实 验

在本工作中,我们利用 APSYS 软件建立二维器件模型。其中,TJ-Inversion LED 器件结构如图 1(a)所示。包括 $0.5 \mu\text{m}$ 厚的 n-GaN 接触层(Si 掺杂浓度: $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、 n^+ -GaN/ $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ / p^+ -GaN 隧道结 TJ、 30 nm 厚的 p-GaN 空穴传输层(Mg 掺杂浓度: $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)、 75 nm 厚的 $\text{p-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 电子阻挡层 EBL(Mg: $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)、5 对 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ (3 nm)/GaN (12 nm) 多量子阱以及 $0.35 \mu\text{m}$ 厚的 n-GaN 电子传输层(Si: $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)。隧道结中, n^+ -GaN 层(Si: $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) 的厚度为 20 nm , $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ 插入层的厚度为 5 nm , p^+ -GaN(Mg: $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) 的厚度为 20 nm 。同时,设置无隧道结

的 Inversion LED 以及传统 N-polar LED、Ga-polar LED, 结构参数保持一致, 四个 LED 的台面尺寸均为 $50\ \mu\text{m}$, 器件结构如图 1(b)、(c)、(d) 所示。

在我们的模拟中, 设置 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合寿命为 $10\ \text{ns}$ ^[20], 俄歇系数为 $2 \times 10^{-30}\ \text{cm}^6/\text{s}$ ^[21]。此外, InGaN/GaN 的 $\Delta E_c/\Delta E_v$ 比设定为 $0.7/0.3$ ^[22]。考虑到位错等缺陷对极化电荷的屏蔽效应, 我们设定极化屏蔽因子(screening)为 0.4 ^[23]。其他材料参数可参见相关文献^[24]。

3 结果与讨论

我们模拟了 TJ-Inversion LED、Inversion LED

和 N-polar LED、Ga-polar LED 的电流-电压(I-V)曲线, 如图 2(a)所示。结果表明, Ga-polar LED 表现出最高的开启电压, 约为 $3.3\ \text{V}$; 相比之下, TJ-Inversion LED、Inversion LED 及 N-polar LED 的开启电压较小, 在 $3\ \text{V}$ 左右。值得注意的是, 在相同电压下, TJ-Inversion LED 的电流密度略高于 Inversion LED, 表明隧道结的引入有效降低了倒置 LED 的串联电阻。图 2(b)展示了四种 LED 的电致发光(EL)光谱。TJ-Inversion LED、Inversion LED 和 N-polar LED 的发光波长位于 $420\ \text{nm}$ 左右, 而 Ga-polar LED 的波长红移至 $431\ \text{nm}$ 。其中, TJ-Inversion LED 展现了最强的发光强度。

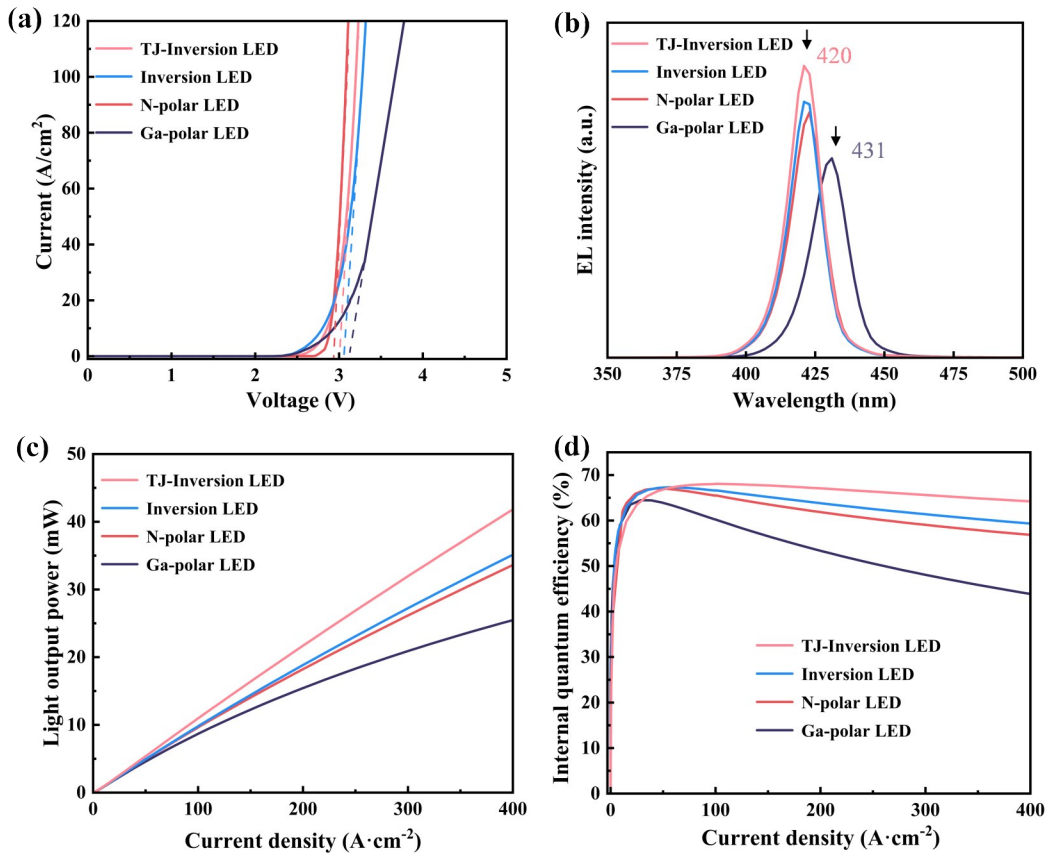


图 2 四种 LED 的(a)I-V 特性、(b)EL 曲线、(c)LOP 曲线和(d)IQE 曲线

Fig. 2 (a) I-V characteristics, (b) EL intensity, (c) LOP and (d) IQE of the four LEDs

同时, 四种 LED 的光输出功率(LOP)如图 2(c)所示。在 $400\ \text{A}/\text{cm}^2$ 下, TJ-Inversion LED 的光输出功率达到约 $41.8\ \text{mW}$, Inversion LED 和 N-polar LED 分别为 $35.1\ \text{mW}$ 和 $33.6\ \text{mW}$, 而 Ga-polar LED 仅为 $25.5\ \text{mW}$ 。TJ-Inversion LED 的光输出功率比 Ga-polar LED 提升约 64% , 比 N-polar LED 提升约 24% 。图 2(d)给出了四种 LED 内量子效率(IQE)随电流密度的变化曲线。其中, TJ-Inversion

LED 的峰值 IQE 最高, 达到了 67.8% 。在 $400\ \text{A}/\text{cm}^2$ 电流密度下, TJ-Inversion LED 的 IQE 仍维持在约 64% , 效率衰减(droop)最低, 仅为 5.6% ; Inversion LED 和 N-polar LED 分别降至 60% 和 57% ; Ga-polar LED 则急剧衰减至 44% , 衰减幅度超过 32% 。结果表明 TJ-Inversion LED 在 LOP、IQE 和低 droop 等方面优于其他 LED, 具有最好的光电特性。

本工作仿真结果与已报道 TJ-Inversion LED、

N-polar LED、Ga-polar LED 的实验数据汇总于表 1。在蓝光波段,TJ-Inversion LED 的开启电压为 3.0 V,与文献报道值基本吻合;而 Ga-polar LED 的开启电压较文献实测值偏高 0.35 V。已有研究指出^[25],Ga-polar LED 外延生长会形成 V 型坑,V 型坑可改善空穴注入、降低器件开启电压。而本文仿真模型未引入 V 型坑结构,因此开启电压

偏高。本工作的 LOP 显著高于文献[15]、[17]的实测结果,该差异源于两篇文献器件的顶部、底部均采用不透明金属接触叠层,且未开展光提取优化,导致光功率衰减至 μW 量级以及本工作未考虑实验外延缺陷。综合对比光电性能可见,TJ-Inversion LED 相比传统 N-polar LED 与 Ga-polar LED 具备更优异的发光性能。

表 1 本工作仿真结果与已报道 TJ-Inversion LED、N-polar LED、Ga-polar LED 的实验数据

Tab. 1 The simulation results of this work and experimentally reported data for TJ-inversion LED, N-polar LED, and Ga-polar LED

	structure	Von(V)	Wavelength(nm)	LOP	IQE(%)	Droop(%)
This work	TJ-Inversion LED	3.0	420	41.8 mW @400 A/cm ²	67.8	5.6
	N-polar LED	2.8	422	33.6 mW @400 A/cm ²	66.7	14.5
	Ga-polar LED	3.3	431	25.5 mW @400 A/cm ²	64.4	32
[15]	TJ-Inversion LED	4	500	10 μW @200 A/cm ²	76 $\pm$ 1.34	—
	N-polar LED	3–3.5	520	10 ⁻² μW @200 A/cm ²	77 $\pm$ 0.86	—
[17]	TJ-Inversion LED	2.85	450	1.4 μW @900 A/cm ²	—	—
	Ga-polar LED	2.95	445	0.3 μW @900 A/cm ²	—	—

图 3 给出四种 LED 在 200 A/cm² 下的能带图以探究四种 LED 在光电性能上的差异。从载流子注入势垒来看,Ga-polar LED 的空穴注入势垒(283 meV)与电子注入势垒(428 meV)均为四种器件中最高,严重阻碍了载流子向有源区的输运,

导致其开启电压升高。与之相比,N-polar LED 的空穴注入势垒(194 meV)和电子注入势垒(134 meV)降至最低,导通特性得到显著改善;Inversion LED 的空穴与电子注入势垒分别为 210 meV 与 140 meV,略高于 N-polar LED,但仍优于 Ga-po-

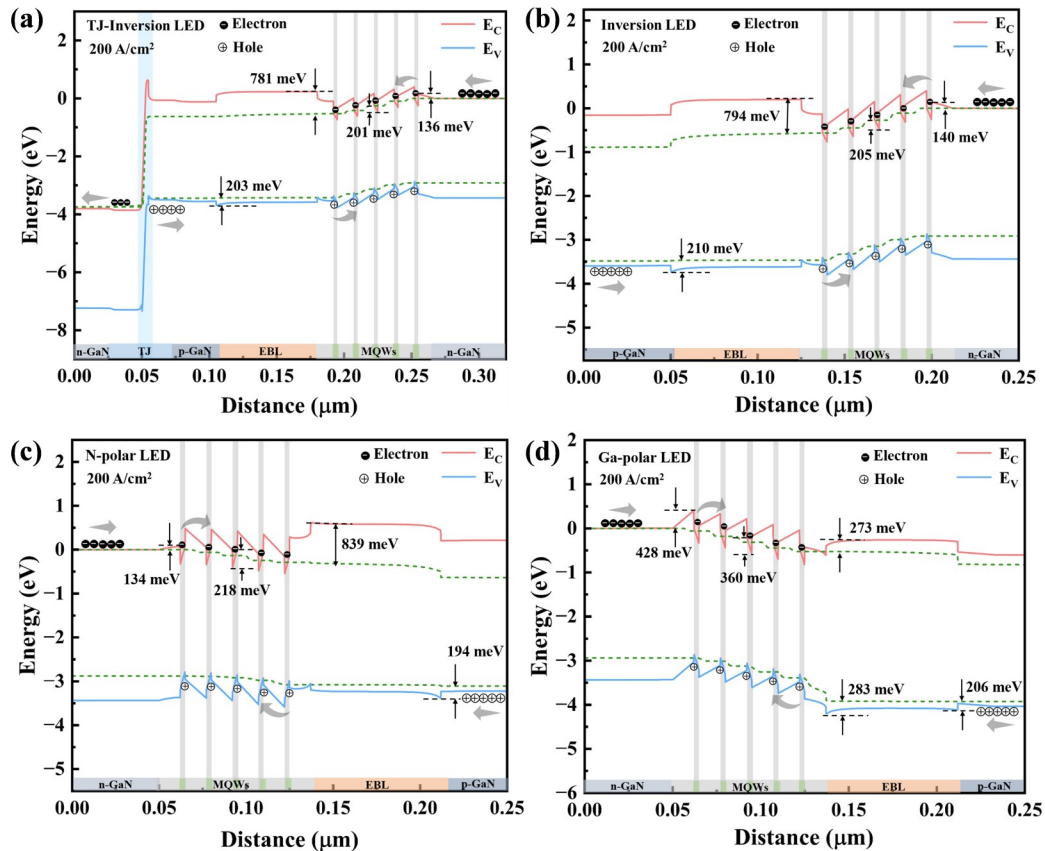


图 3 200 A/cm² 电流密度下 (a) TJ-Inversion LED、(b) Inversion LED、(c) N-polar LED、(d) Ga-polar LED 的能带图

Fig. 3 Energy band diagrams of (a) TJ-Inversion LED (b) Inversion LED (c) N-polar LED and (d) Ga-polar LED at 200 A/cm²

lar LED。TJ-Inversion LED 在 Inversion LED 的基础上, 引入了隧道结(图 3(a)蓝色阴影区域), 将空穴注入势垒进一步降至 203 meV, 空穴注入得到改善, 电子注入势垒也由 140 meV 降至 136 meV, 串联电阻由此降低。因此其开启电压小于 Inversion LED。

就电子阻挡能力而言, Ga-polar LED 的 EBL 电子阻挡势垒仅 273 meV, 难以有效阻挡电子向 p 侧的泄漏; N-polar LED 凭借 839 meV 的高电子阻挡势垒获得了最强的电子限域效果; Inversion LED 和 TJ-Inversion LED 的 EBL 阻挡势垒为 794 meV 和 781 meV, 电子阻挡能力较高, 电子限制能力良好。

值得注意的是, 四种 LED 的量子阱倾斜存在明显的差异。Ga-polar LED 的 MQWs 导带倾斜量最大, 为 360 meV。表明在强电场下量子阱内具有强的 QCSE^[26], 这也是其 LOP 仅为 25.5 mW, EL 峰位红移至 431 nm 的根本原因。N-polar LED 在外加电场与极化电场反向的作用下^[11], 导带倾斜量降至 218 meV, 量子阱电场显著降低, 其 LOP 提升至 33.6 mW, 光电特性明显改善。Inversion LED 通过反转 p、n 层序列, 将导带倾斜量降至 205 meV, 表明倒置结构同样削弱了量子阱电场。相比之下, TJ-Inversion LED 的导带倾斜量仅为 201 meV, 量子阱电场最低, 使其在获得低开启电压的同时, 实现了最强的 LOP、最高的 IQE 与最小的 droop。

对于图 3 四种 LED 存在量子阱倾斜差异的问题, 图 4(a) 给出 TJ-Inversion LED、Ga-polar LED 在 0 A/cm² 下以及在 200 A/cm² 下量子阱区域内的电

场分布。同时给出 Inversion LED、N-polar LED 在 200 A/cm² 的电场分布作为对照。在 0 A/cm² 时, TJ-Inversion LED MQWs 的电场大小为 1.36 MV·cm⁻¹。Ga-polar LED 电场较小, 为 1.20 MV·cm⁻¹。当电流增大至 200 A/cm² 时, TJ-Inversion LED、Inversion LED、N-polar LED 电场呈现减小趋势, 其中前两者电场相近, 为 0.80 MV·cm⁻¹, 略低于 N-polar LED。而 Ga-polar LED 电场则呈现增大趋势, 由初始的 1.20 MV·cm⁻¹ 增大至 1.35 MV·cm⁻¹。这与能带图中量子阱导带倾斜量对应, 证实了 TJ-Inversion LED 通过改变 p 型层和 n 型层顺序, 有效降低了 MQWs 电场, 缓解了 Ga-polar LED 存在的量子阱倾斜加剧问题。进一步说明低 MQWs 电场有利于提高 LED 发光性能。

为验证量子阱电场对器件发光性能的影响, 图 4(b) 展示了四种 LED 在 200 A/cm² 下量子阱区域的典型量子阱电子空穴波函数重叠度。得益于低 MQWs 电场, TJ-Inversion LED 电子空穴波函数实现最大重叠, 这与其 201 meV 的低量子阱倾斜量直接相关, 表明倒置结构降低了量子阱内的电场, 增大了电子空穴波函数重叠度, 有效减弱 QCSE, 使其具有最大的 LOP 和 IQE, 并且发光波长蓝移。此外, 结合图 4(a) 与图 4(b), 可以观察到每种 LED 波函数重叠度最大的位置都出现在 MQWs 电场最低的地方, 如 TJ-Inversion LED 第三对量子阱 QW3、Ga-polar LED 第一对量子阱 QW1。这说明波函数重叠度随 MQWs 电场降低而增大, MQWs 电场越低, 越有利于提高 LED 发光性能。

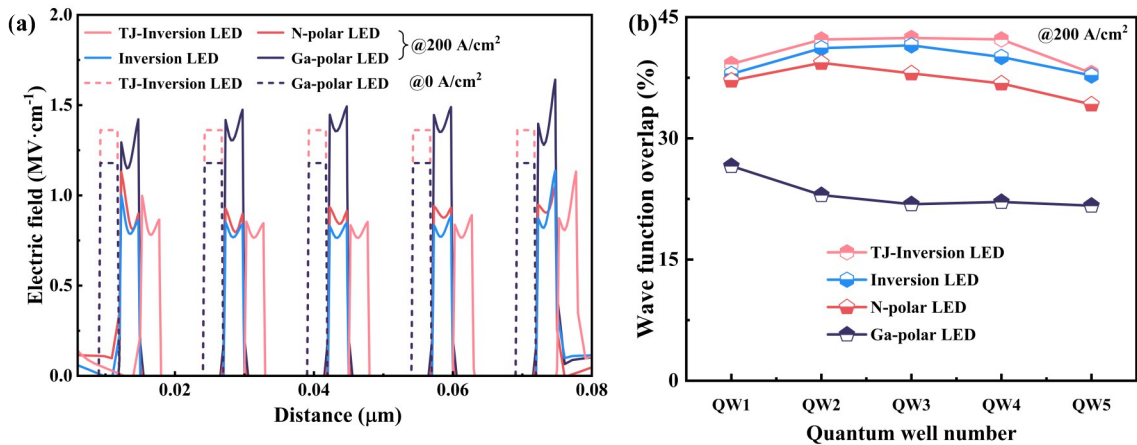


图 4 (a) 0 A/cm² 下 TJ-Inversion LED、Ga-polar LED 和 200 A/cm² 下 TJ-Inversion LED、Inversion LED、N-polar LED、Ga-polar LED 量子阱内电场分布, (b) 200 A/cm² 下四种 LED 量子阱区域电子空穴波函数重叠度

Fig. 4 (a) Electric field distribution in the quantum well of TJ-Inversion LED, Ga-polar LED at 0 A/cm², and TJ-Inversion LED, Inversion LED, N-polar LED, Ga-polar LED at 200 A/cm², (b) Electron-hole wave function overlap in the quantum well region of four LEDs at 200 A/cm²

本工作给出如图5所示的四种LED的物理模型图以解释量子阱电场变化原因。其中LED内建电场 E_{junction} 方向由n型区指向p型区,外加电场 E_{bias} 方向由p型区指向n型区。Ga-polar LED、TJ-Inversion LED极化场 E_{polar} 方向由表面指向衬底, N-polar LED极化场方向由衬底指向表面。可以看出, Ga-polar LED外加电场与极化场同向, N-polar LED、TJ-Inversion LED的外加电场与极化场反向。当电流密度为0 A/cm²时,量子阱内电场为p-

n结电场与极化电场的矢量叠加,因此TJ-Inversion LED电场大于Ga-polar LED。在电流密度为200 A/cm²时,外加偏压使能带平带化,抵消了p-n结电场,此时量子阱内电场以外电场与极化电场的矢量叠加为主导。所以TJ-Inversion LED、N-polar LED电场减小, Ga-polar LED电场增大。因此, TJ-Inversion LED通过反转电流流向使外加电场与极化场方向反向,实现了与N-polar LED相同的优势。

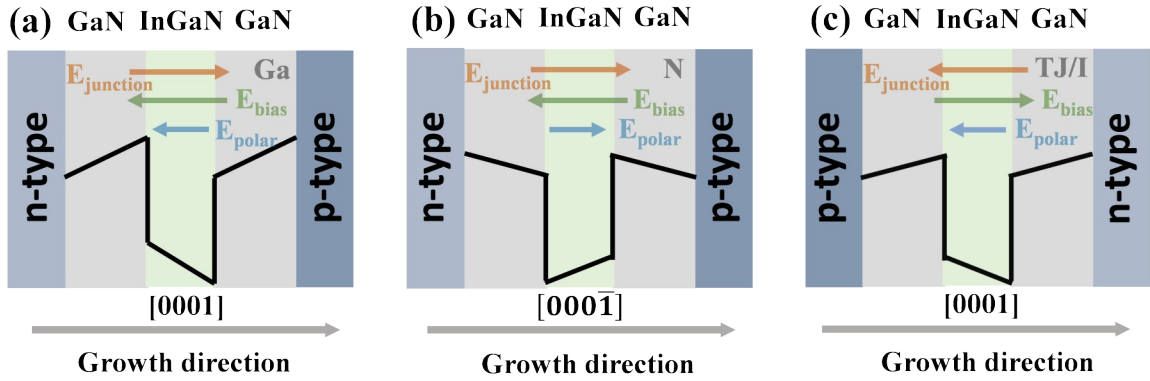


图5 (a)Ga-polar LED、(b)N-polar LED、(c)TJ-Inversion/Inversion LED的物理模型

Fig. 5 Physical model of (a)Ga-polar LED、(b)N-polar LED、(c)TJ-Inversion/Inversion LED

本工作进一步模拟了四种LED在200 A/cm²下量子阱区域各类型发光复合率,如图6(a)、(b)、(c)、(d)所示,并将占比统计在图6(e)中。结果显

示所有LED均以辐射复合发光为主。Ga-polar LED由于其量子阱强的QCSE,导致辐射复合率最低,俄歇复合率最高。由于LED器件IQE随电流

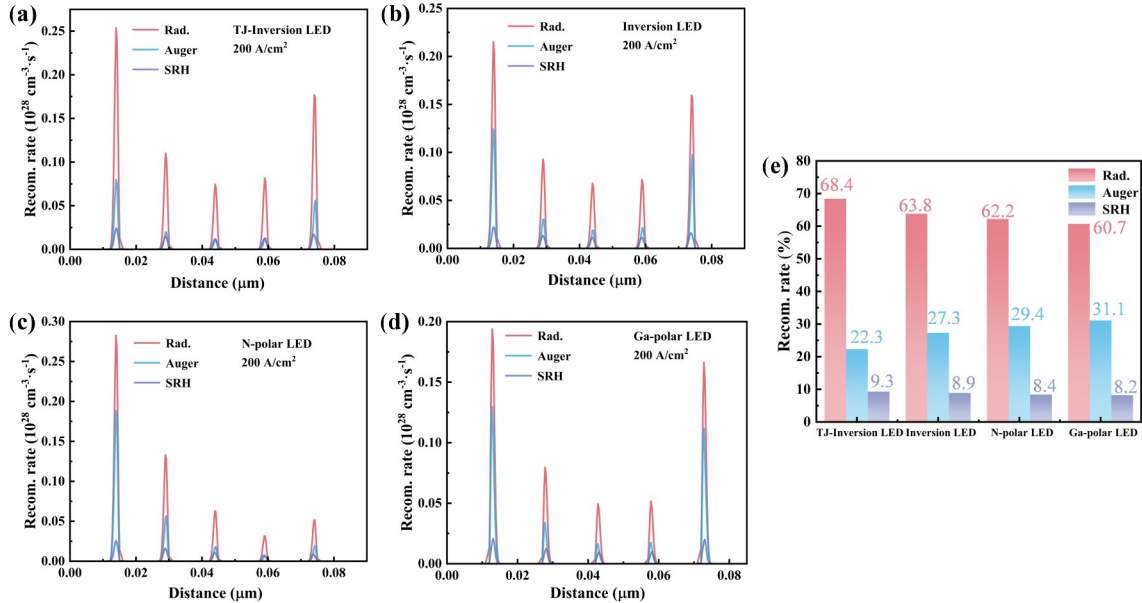


图6 200 A/cm²下(a)TJ-Inversion LED、(b)Inversion LED、(c)N-polar LED、(d)Ga-polar LED量子阱区域各类型复合率及(e)四种LED各类型复合率占比

Fig. 6 Types of recombination rates in the quantum well region of (a)TJ-Inversion LED、(b)Inversion LED、(c)N-polar LED、(d)Ga-polar LED at 200 A/cm² and (e) the proportion of each type of recombination rate for the four LEDs

密度增加而衰减的原因与高电流密度下俄歇复合率的增加有关^[27]。因此,Ga-polar LED在400 A/cm²高电流密度下IQE急剧衰减至44%,发光特性较差。Inversion LED的辐射复合率为63.8%,略高于N-polar LED的62.2%,因此其发光强度大于N-polar LED。相比之下,TJ-Inversion LED辐射复合率最高,为68.4%。这与其量子阱更弱的QCSE有关,使其在400 A/cm²更高电流密度下仍维持约64%内量子效率及41.8 mW光输出功率。

4 结 论

本工作模拟了一种p型层在下、n型层在上的具有隧道结的镓极性 GaN 基倒置 LED(TJ-Inversion LED),研究了其光电性能并分析能带物理。

结果表明,TJ-Inversion LED通过反转p、n层顺序使外加电场与极化场方向反向,有效削弱了量子阱内的电场,在保持高电子阻挡能力的同时提高了电子空穴波函数重叠度和辐射复合率,使其发光性能得到提升。然而隧道结重掺杂Mg激活困难、未考虑实验外延缺陷和Mg扩散、未考虑自热效应与器件尺寸优化等局限使其在实际外延生长和工艺实现中面临一定的挑战。本工作将为高性能 GaN 基 LED 的结构设计提供了一种有潜力的设计思路。

本文专家审稿意见和作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260267>.

参 考 文 献:

- [1] LoM H, TuP M, WangC H, *et al.* High efficiency light emitting diode with anisotropically etched GaN-sapphire interface [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(4): 041109.
- [2] 陈伟超,唐惠丽,罗平,等. GaN基发光二极管衬底材料的研究进展[J]. *物理学报*, 2014, 63(6): 068103.
CHEN W C, TANG H L, LUO P, *et al.* Research progress of substrate materials used for GaN-based light emitting diodes [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(6): 068103.
- [3] BUFFOLO M, MENECHINI M, MENECHESSE G, *et al.* Defects and reliability of GaN-based LEDs: Review and perspectives [J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2022, 219(11): 2100738.
- [4] 王麒,杨波波,李威晨,等. Micro-LED器件:从极性c面到非极性或非极性的发展趋势[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(10): 1345-1359.
WANG Q, YANG B B, LI W C, *et al.* Micro-LED devices: The trend from polar c-plane to nonpolar or semipolar [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(10): 1347-1360.
- [5] SCHWARZ U T, KNEISSL M. Growth and optical properties of GaN-based non- and semipolar LEDs [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2025: 1-42.
- [6] ZHANG Y, XU R, KANG Q, *et al.* Recent advances on GaN-based Micro-LEDs [J]. *Micromachines*. 2023; 14(5):991.
- [7] WANG Y, ZHANG Z, LI Y, *et al.* Study of Ga-polar and N-polar GaN-based green VCSELs by simulation [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2024, 16(1): 1-8.
- [8] LING S C, LU T C, CHANG S P, *et al.* Low efficiency droop in blue-green m-plane InGaN/GaN light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010; 96(23): 231101.
- [9] WANG C H, KE C C, LEE C Y, *et al.* Hole injection and efficiency droop improvement in InGaN/GaN light-emitting diodes by band-engineered electron blocking layer [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2010; 97(26): 261103.
- [10] AKYOL F, NATH D N, KRISHNAMOORTHY S, *et al.* Suppression of electron overflow and efficiency droop in N-polar GaN green light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(11): 111118.
- [11] LI Y F, HU X T, SONG Y M, *et al.* The role of AlN thickness in MOCVD growth of N-polar GaN [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 884: 161134.
- [12] TUOMISTO F, SAARINEN K, LUCZNIK B, *et al.* Effect of growth polarity on vacancy defect and impurity incorporation in dislocation-free GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86(3).
- [13] MOHANTY S, KHAN K, AHMADI E. N-polar GaN: Epitaxy, properties, and device applications [J]. *Prog. Quantum Electron.*, 2023, 87: 100450.

- [14] MASAHIRO K, SHASHWAT R, CRISTYAN E Q, *et al.* On the origin of carrier loss in Mg-doped N-polar GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2025, 127 (24): 242105.
- [15] TARA B, KAROLINA P MIKOŁAJ C, *et al.* Comparison of the LEDs benefiting from built-in electric fields grown on Ga- and N-polar bulk GaN substrates [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2025, 40: 105010.
- [16] Lee K. J., Nakazato Y., Chun J., *et al.* Nanoporous GaN on p-type GaN : a Mg out-diffusion compensation layer for heavily Mg-doped p-type GaN [J]. *Nanotechnology*, 2022, 33(50).
- [17] MIKOŁAJ C, HENRYK T, MIKOŁAJ Z, *et al.* Bottom tunnel junction-based blue LED with a thin Ge-doped current spreading layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 120 (17): 171104.
- [18] SRIRAM K, DIGBIJOY N N, FATIH A, *et al.* Polarization-engineered GaN/InGaN/GaN tunnel diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97 (20): 203502.
- [19] LI J, YAO W Z, CHEN F, *et al.* High-performance AlGaIn ultraviolet light-emitting diode with a tunnel junction based on inverted architecture [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2025, 40: 125006.
- [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] MUHAMMAD U, UROOJ M, MUNAZA M, *et al.* Enhancement of the optoelectronic performance of p-down multiquantum well N-GaN light-emitting diodes [J]. *Phys. Scr.*, 2019, 94: 105808.
- [22] KIM S J, SON, S H, KIM, T G. Improved light output power in GaN-based vertical light-emitting diodes with p-AlInGaIn/GaN superlattices [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2012, 60: 1258 – 1262.
- [23] QIU X, ZHANG, HANG Y S, *et al.* Enhancing the lateral current injection by modulating the doping type in the P-type hole injection layer for InGaIn/GaN vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Opt. Exp.*, 2020, 28(12): 18035 – 18048.
- [24] MUHAMMAD U, KIRAN S, HAN D P, *et al.* Degradation effect of Auger recombination and built-in polarization field on GaN-based light-emitting diodes [J]. *AIP Advances*, 2018, 8 (1): 015005.
- [25] QUAN Z J, LIU J L, FANG F, *et al.* A new interpretation for performance improvement of high-efficiency vertical blue light-emitting diodes by InGaIn/GaN superlattices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118: 193102.
- [26] SUSKI T, STASZCZAK G, TRZECIAKOWSKI W, *et al.* Quantum-confined stark effect in polar InGaIn/GaN quantum wells of different widths studied by photoluminescence under hydrostatic pressure [J]. *Materials*, 2026, 19(12): 2473.
- [27] 纪泽婷, 邓高强, 王昱森, 等. 具有组分渐变量子垒层的氮极性 InGaIn 基红光 LED 仿真研究[J]. *发光学报*, 2024, 45(12): 2037-2044.
- JIZ T, DENG G Q, WANG Y S, *et al.* Simulation on Nitrogen-polar InGaIn-based red light-emitting diodes with compositionally graded quantum barrier layer [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2024, 45(12): 2037-2044.



赵通(2001-),男,宁夏中卫人,硕士研究生,2024年于吉林大学获得学士学位,主要从事氮化镓发光器件的研究。
E-mail: 2981916864@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



杨天鹏(1978-),男,山东菏泽人,博士,教授级高级工程师,2009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: yangtianpeng@jlu.edu.cn