

文章编号: 1000-7032(2022)05-0773-13

电子阻挡层 Al 组分对 GaN 基蓝光激光二极管光电性能的影响

杜小娟¹, 刘 晶², 董海亮^{3*}, 贾志刚³, 张爱琴⁴, 梁 建^{1*}, 许并社^{3,5}

(1. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854;

3. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

4. 太原理工大学 轻纺工程学院, 山西 太原 030024; 5. 陕西科技大学 材料原子·分子科学研究所, 陕西 西安 710021)

摘要: 采用 SiLENSe (Simulator of light emitters based on nitride semiconductors) 软件仿真研究了 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 电子阻挡层 (EBL) Al 组分渐变方式对 GaN 基激光二极管 (LD) 光电性能的影响, 实现了提高输出功率和电光转换效率的目的。文中提出的四种 Al 组分渐变方式分别是传统均匀组分、右阶梯渐变组分 (0 ~ 0.07 ~ 0.16)、三角形渐变组分 (0 ~ 0.16 ~ 0)、左阶梯渐变组分 (0.16 ~ 0.07 ~ 0)。结果表明, 与传统均匀组分 EBL 结构相比, Al 组分阶梯渐变 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ EBL LD 导带底的电子势垒显著提高, 价带顶的空穴势垒降低。这主要是由于该结构能有效抑制电子泄漏和提高空穴注入效率, 从而提高有源区载流子浓度, 进而提高有源区辐射复合效率。当注入电流为 0.48 A 时, 采用 Al 组分阶梯渐变 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ EBL 结构能将器件开启电压从 5.1 V 降至 4.9 V, 光学损耗从 3.4 cm^{-1} 降至 3.29 cm^{-1} , 从而使光输出功率从 335 mW 提高至 352 mW, 电光转换效率从 12.5% 提高至 13.4%。此外, 讨论了 Al 组分阶梯渐变 EBL 结构对 GaN 基蓝光 LD 光电性能的影响机制。该结构设计将为外延生长高功率 GaN 基 LD 提供实验数据和理论支撑。

关键词: GaN 基蓝光激光二极管; 电子阻挡层; Al 组分; 光电性能

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20220016

Effect of Al Composition of Electron Blocking Layer on Photoelectric Performance of GaN-based Blue Laser Diode

DU Xiao-juan¹, LIU Jing², DONG Hai-liang^{3*}, JIA Zhi-gang³,ZHANG Ai-qin⁴, LIANG Jian^{1*}, XU Bing-she^{3,5}

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Aerospace Science and Technology Defense Technology Research and Experimental Center, Beijing 100854, China;

3. Key Laboratory of Interface Science and Engineering of New Materials, Ministry of Education,

Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

4. College of Textile Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

5. Institute of Atomic and Molecular Science of Materials, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

* Corresponding Authors, E-mail: dhlyut@163.com; liangj1220@126.com

Abstract: The influence of Al composition-graded of $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ electron blocking layer (EBL) on the photoelectric performance of GaN-based laser diode was numerically investigated using SiLENSe (Simulator of light emitters based on nitride semiconductors) software to achieve high output power and high conversion efficiency. The four Al composition graded modes in this paper are

收稿日期: 2022-01-13; 修订日期: 2022-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(61904120, 21972103); 国家重点研发计划(2016YFB0401803); 山西省基础研究项目(201901D111111)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61904120, 21972103); National Key Research and Development Program of China (2016YFB0401803); Basic Research Program of Shanxi Province (201901D111111)

traditional uniform composition, right step-graded composition(0 - 0.07 - 0.16), triangle-graded composition(0 - 0.16 - 0), and left-step graded composition(0.16 - 0.07 - 0) respectively. Comparing with the traditional homogeneous composition EBL, it was found that Al composition step-graded EBL not only could significantly enhance band offset of conduction band result in reducing the electron leakage, but also could decrease band offset of valence band in order to improve holes injection efficiency and enhance radiative recombination efficiency. This is mainly due to the fact that Al step-graded composition structure could effectively restrain the electron leakage to the p-side and improve holes injection efficiency, so as to increase the carrier concentration and radiation recombination in the active zone. The Al step-graded composition EBL could effectively reduce opening voltage from 5.1 V to 4.9 V and decrease optical loss from 3.4 cm^{-1} to 3.29 cm^{-1} , thus the output power was increased from 335 mW to 352 mW and the conversion efficiency was increased from 12.5% to 13.4% respectively at the current density of 6 kA/cm^2 . In addition, the influence mechanism of Al step-graded composition EBL on the photoelectric performances of GaN-based laser diode was discussed. This structure will provide experimental data and theoretical support for the epitaxial growth of high-power GaN-based laser diode.

Key words: GaN-based blue laser diodes; electron blocking layer; Al composition; photoelectric performance

1 引 言

1995年,第一支 GaN 基激光二极管(Laser diode, LD)问世,就此揭开了 GaN 基 LD 的序幕^[1]。近几十年来,由于 GaN 基 LD 在激光显示、材料加工、信息存储、激光通讯等领域越来越广泛的应用,逐渐成为激光领域研究的热点^[2]。随着外延材料的优化和生长技术不断提高, GaN 基蓝光 LD 光电性能有了很大的提升,但是由于蓝光 LD 外延结构复杂,获得高性能 GaN 基蓝光 LD 在技术方面仍然面临着诸多挑战^[3]。例如,载流子泄漏对 GaN 基蓝光 LD 电光转换效率和输出功率有重要影响^[4]。极化效应是导致载流子泄漏的关键因素。极化效应由自发极化和压电极化两部分构成。LD 结构中由于外延层材料之间晶格常数不同导致较大的压电极化, III 族氮化物在 *c* 面衬底上生长产生自发极化。首先,极化效应产生较强的内建电场,导致电子和空穴波函数分离,降低量子阱中的辐射复合效率^[5-6];其次, InGaN 与 GaN 之间存在的晶格失配产生大量位错,形成非辐射复合中心,从而导致载流子泄漏^[7-8]。由于电子和空穴的迁移速率不同,量子阱中电子和空穴浓度分布不均匀导致有源区非辐射复合效率提高,从而降低了蓝光 LD 的辐射复合效率^[9-12]。

通过调控 GaN 基蓝光 LD 的电子阻挡层

(EBL)来降低载流子泄漏,从而提高输出功率。诸多研究者提出不同的 EBL 结构降低极化效应和调控能带弯曲。1996年, Nakamura 等将传统 AlGaIn EBL 引入脊形发射 LD 外延结构中^[1],并得到了广泛应用^[13-15]。结果表明, AlGaIn EBL 结构减少了电子泄漏,提高了内量子效率(Internal quantum efficiency, IQE)。因此, EBL 引入为抑制电子泄漏提供了解决思路。然而,随着应用需求提高对 LD 的输出功率提出了更高的要求,在大电流注入条件下,传统均匀组分 AlGaIn EBL 抑制电子泄漏和促进空穴注入效率还需进一步提升, IQE 有待提高^[16]。这是因为 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ EBL 和势垒的界面处带阶较大,导带带阶越大,越有利于阻挡电子,导致界面处积累了大量自由电子,形成极化电场,从而阻止空穴注入^[17];另外,氮化物半导体也会不可避免地形成空穴势垒从而影响空穴注入。2008年, Chen 等提出四元 $\text{Al}_{0.25}\text{In}_{0.144}\text{Ga}_{0.606}\text{N}$ EBL, 与传统 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ EBL 相比明显提高了 LD 的光电性能,这主要是因为采用 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 材料降低了极化效应,提高了空穴注入效率和降低了电子泄漏^[18]。2011年, Zhang 等提出阶梯渐变的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ EBL, 与传统均匀组分 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 相比,阶梯渐变的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ EBL 降低了极化效应,减少了载流子泄漏和光子损耗,从而使阈值电流降至 2.5 kA/cm^2 , IQE 从 60% 提高到 92%^[19]。

2012 年, Morawiec 等将 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 应用在势垒中, 调节 InGaN 量子阱中的极化效应, 从而达到降低载流子泄漏和提高 IQE 的目的^[20]。2016 年, Alahyarizadeh 等通过实验将 AlGaIn 和 AlInGaIn EBL LD 的光电性能进行了对比分析, 结果表明, AlInGaIn EBL 结构 LD 的势垒与 EBL 的导带带阶较高, 从而抑制了电子泄漏^[21]。2017 年, Lin 等提出 $\text{Al}_{0.35}\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.47}\text{N}$ EBL LED, 与传统 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ EBL 相比, 输出功率提高了 31.38%, 这是由于调控 Al/In 比率增加了导带带阶高度, 减少了价带带阶高度, 从而减少了电子泄漏和增加了空穴注入^[22]。2018 年, Xing 等通过优化 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ EBL 中的 Al 组分从而实现了抑制量子阱中载流子泄漏的目的^[23]。因此, 通过调控 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 中的 Al 组分调节带隙范围可以抑制电子泄漏, 但是还有待进一步改善。通过调节合金组分, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ EBL 可以调控势垒和 EBL 之间导带和价带的带阶, 但是不能调节导带和价带的带阶比, 即无法在提高导带带阶高度的同时降低价带带阶高度, 从而实现更好抑制电子泄漏和提高空穴注入的目的。2021 年, He 等提出了 p-AlInGaIn/AlGaIn 超晶格 EBL, 降低了能带弯曲效应, 减少了电子泄漏, 提高了空穴注入^[24]。通过以上分析可知严重的电子泄漏和低的空穴注入效率导致 IQE 降低^[25]。 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 被认为是最具有发展潜力的 EBL 材料^[26-28]。调控四元 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 中 Al/In 的比率, 相比 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料带隙, 其调节范围更大, 调节 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 与量子阱的晶格匹配, 可降低极化效应, 从而提高空穴注入效率。因此, $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ EBL 结构不仅能够降低电子泄漏, 而且还能提高空穴注入效率, 从而提高 IQE。因此, 将四元 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 材料应用在 GaN 基 LD 的 EBL 中, 并对 Al 组分渐变方式进行优化能够降低极化效应, 增加带隙, 从而提高阻挡电子泄漏的导带势垒高度和降低空穴注入的价带势垒高度, 实现抑制电子泄漏和提高空穴注入的目的。优化四元化合物 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 的 Al 组分渐变方式是提高 LD 性能的重要方法之一。然而, 四元化合物 AlInGaIn 由于其生长窗口小和制作难度大, 制备高质量 AlInGaIn 晶体成为一大难题。这是因为 AlN、GaN 和 InN 之间互溶性差, 所以采用金属有机化学气相沉积生长高质量四元 AlGaInN 比生长 GaN 和 InGaIn 更

困难^[29]。

本文采用 SiLENSe 计算模拟软件对四元 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ EBL 中 Al 组分渐变方式进行优化。其中一种为传统均匀组分 $\text{Al}_{0.16}\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$ EBL 结构 LD, 即 Al 组分保持不变; 另外两个 LD 的 EBL 是 Al 组分阶梯渐变 EBL 结构, Al 组分渐变方式分别是 (0 ~ 0.07 ~ 0.16) 和 (0.16 ~ 0.07 ~ 0); 还有一个是 Al 组分三角形渐变的 EBL 结构 LD, 即 (0 ~ 0.16 ~ 0)。对四种 LD 的光电性能进行了分析和表征。能带图表明 Al 组分阶梯渐变 EBL (0 ~ 0.07 ~ 0.16) 相对于传统 EBL 阻碍电子泄漏的导带势垒高度明显提高, 有利于空穴注入的价带势垒高度降低, 提高了载流子注入效率和辐射复合效率, 从而提高了 LD 的 IQE; 光场分布图表明 Al 组分阶梯渐变 EBL 结构能够将光场限制在有源区内, 降低了光子损耗, 从而降低了阈值电流。

2 LD 结构和模拟参数

传统均匀 Al 组分 $\text{Al}_{0.16}\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$ EBL LD 作为参考^[30]。本文研究的 GaN 基蓝光 LD 外延层结构从 n 侧到 p 侧顺序依次为: 700 nm 厚的 GaN 接触层 (Si 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$); 550 nm 厚的 $\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}$ GaN 激射层 (Si 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$); 由 100 nm GaN 层和 40 nm 厚的 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 层组成的双波导 (Waveguide layer, WG) (Si 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$); 5 个 3 nm 厚的 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ 量子阱 (Quantum well, QW); 4 个 12 nm 厚的 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 的量子垒层 (Quantum barrier, QB), 量子阱与量子垒间隔堆叠构成有源区; 20 nm 厚的 $\text{Al}_{0.16}\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$ EBL (Si 掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$); 70 nm 厚的 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ p 波导层 (UWG) (Mg 掺杂为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$); 400 nm 厚的 GaN 激射层 (Mg 掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$); 100 nm 厚的接触层 (Mg 掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)。如图 1(a) 所示。

理论研究了 GaN 基蓝光 LD 的物理性能。LD 的腔长和条宽分别为 800 μm 和 10 μm , 工作温度为 300 K。电流密度在 6 kA/cm^2 时, GaN 基蓝光 LD 获得的 IQE 和电光转化效率都接近最高值, 器件的可靠性最好。同时, 2020 年, 刘建平等在注入电流密度为 6 kA/cm^2 时, 对高功率 GaN

基蓝光 LD 进行了光电性能分析^[31],背反射率和镜面反射率分别为 0.75 和 0.85。考虑到固定缺陷和其他接口电荷对内置极化的部分补偿,设置屏蔽因子为 0.25, GaN/In_xGa_{1-x}N 异质结的带偏比($\Delta E_c/\Delta E_g$) = 0.7/0.3。

四元 AlInGaN 较三元/二元化合物通过调控 Al 和 In 使带隙在一个大的范围变化,从而调节极化效应,同时,组分渐变也是降低极化效应的

方法之一。因此,研究了 Al 组分渐变的四元 Al_xIn_yGa_{1-x-y}N EBL 的性能变化。图 1(b)为传统 Al 均匀组分、右阶梯渐变组分(0 ~ 0.07 ~ 0.16)、三角形渐变组分(0 ~ 0.16 ~ 0)、左阶梯渐变组分(0.16 ~ 0.07 ~ 0)的 EBL 结构示意图,分别标记为 LD1、LD2、LD3、LD4, Al 组分渐变时,EBL 中其他组分都保持不变,除了 EBL Al 组分渐变方式不同,其他结构参数相同。

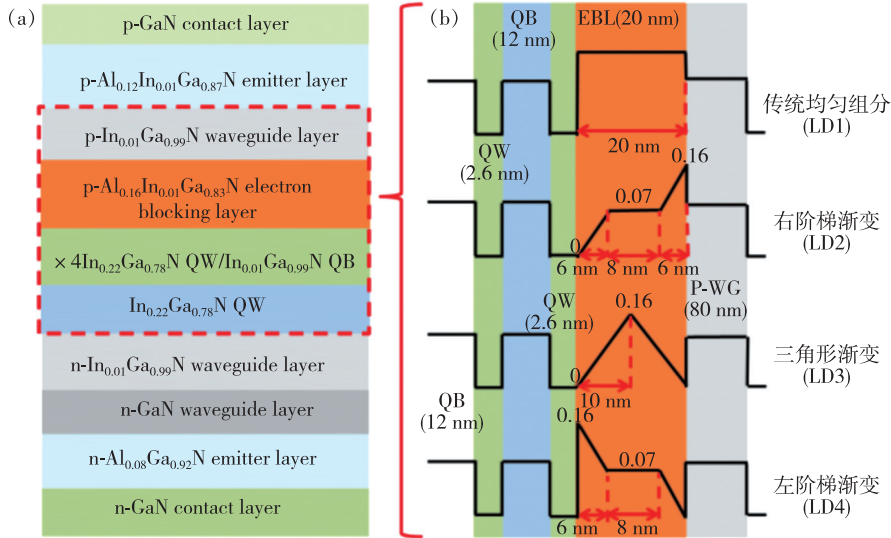


图 1 (a) GaN 基蓝光 LD 外延结构示意图;(b) 四种不同 Al 组分渐变方式 EBL 结构示意图。

Fig. 1 (a) The schematic diagrams of the GaN-based blue LD epitaxial structure. (b) Four different Al composition graded EBL structures.

通过仿真模拟对 GaN 基蓝光 LD 进行模拟计算,通过求解泊松方程、电流连续性方程^[32-33]、电荷输运方程和产生-复合速率方程等来模拟 LD 的光学和电学性能。四元化合物 Al_xIn_yGa_{1-x-y}N 的禁带宽度随组分变化的关系为^[34]:

$$E_g(\text{AlInGaN}) = \frac{xyE_g^u(\text{AlInN}) + yzE_g^v(\text{InGaN}) + xzE_g^w(\text{AlGaN})}{xy + yz + zx}, \quad (1)$$

$$E_g^u(\text{AlInN}) = uE_g(\text{InN}) + (1-u)E_g(\text{AlN}) - u(1-u)B(\text{AlN}), \quad (2)$$

$$E_g^v(\text{InGaN}) = vE_g(\text{GaN}) + (1-v)E_g(\text{InN}) - v(1-v)B(\text{InGaN}), \quad (3)$$

$$E_g^w(\text{AlGaN}) = wE_g(\text{GaN}) + (1-w)E_g(\text{AlN}) - w(1-w)B(\text{AlGaN}), \quad (4)$$

$$u = \frac{1-x+y}{2}, \quad v = \frac{1-y+z}{2}, \quad w = \frac{1-x+z}{2}, \quad (5)$$

其中, x 、 y 和 $z = 1 - x - y$ 分别是 AlInGaN 中的 Al、In 和 Ga 组分。AlInN、InGaN 和 AlGaN 的能带参数分别是 2.5, 1.4, 0.7 eV^[35]。

根据 Fiorentini 理论^[36], $P = P_{sp} + P_{pz}$, P_{sp} 是自发极化, P_{pz} 是压电极化, P_{sp} 和 P_{pz} 对 GaN 基蓝光 LD 具有重要影响。强静电场会产生内置极化, 电子和空穴在量子阱中分离。自发极化可以通过下列公式表示:

$$P_{sp}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = -0.090x - 0.034(1-x) + 0.019x(1-x), \quad (6)$$

$$P_{sp}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = -0.042x - 0.034(1-x) + 0.038x(1-x), \quad (7)$$

AlInGaN、InGaN 和 AlGaN 的压电极化可以通过下述公式计算:

$$P_{pz}(\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}) = P_{pz}(\text{AlN})x + P_{pz}(\text{InN})y + P_{pz}(\text{GaN})(1-x-y), \quad (8)$$

$$P_{pz}(\text{AlN}) = -1.808\varepsilon + 5.624\varepsilon^2, \quad \varepsilon < 0, \quad (9)$$

$$P_{pz}(\text{AlN}) = -1.808\varepsilon - 7.888\varepsilon^2, \varepsilon > 0, \quad (10)$$

$$P_{pz}(\text{GaN}) = -0.918\varepsilon + 9.541\varepsilon^2, \quad (11)$$

$$P_{pz}(\text{InN}) = -1.373\varepsilon + 7.559\varepsilon^2. \quad (12)$$

为了说明极化匹配情况,对半导体外延层与衬底之间的失配度进行计算。设外延薄膜晶格常数为 a_0 ,无应力时衬底的晶格常数为 a_e ,晶格失配度为 δ ,四元 AlInGaN 化合物的晶格常数计算公式与失配度计算方法为^[37]:

$$a_0^{\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}} = a_0^{\text{AlN}}x + a_0^{\text{InN}}y + a_0^{\text{GaN}}(1-x-y), \quad (13)$$

$$\delta = \frac{a_e - a_0}{a_0}, \quad (14)$$

其中 x 、 y 和 $z = 1 - x - y$ 分别是 AlInGaN 中的 Al、In 和 Ga 组分。AlN、InN 和 GaN 的晶格常数分别是 0.311 2, 0.354 0, 0.318 8 nm^[38-39]。由公式可得 Al_{0.16}In_{0.01}Ga_{0.83}N EBL 与 In_{0.01}Ga_{0.99}N 之间的失配度为 0.38%,说明 EBL 与波导层和势垒之间失配度较小,极化效应降低。

3 结果与讨论

3.1 电学性能

为了研究不同 Al 组分渐变方式 EBL 对 LD 能带结构的影响,对不同 Al 组分渐变方式 EBL LD 的能带结构进行分析,从而揭示不同 EBL 能带带阶变化的规律。四元化合物较三元化合物对能带的影响更复杂,四元化合物通过调节 Al 和 In 增加带隙,改变了导带和价带,提高了 EBL 阻碍电子泄漏的势垒高度,降低了空穴注入的势垒高度,这主要是由于极化电场变小,能带图中能带弯曲减小。图 2 是四种 LD 的能带结构图,研究结果表明,当注入电流密度为 6 kA/cm² 时,在极化效应作用下,EBL 层与 InGaN 势垒层界面处导带向下弯曲至费米能级以下,导致在界面处电子容易发生累积。在正向大电流条件下,获得能量的电子很容易从量子阱中溢出,越过 EBL 外延层进入 p 侧区域,引起电子泄漏,从而导致 LD 阈值电流增加^[28]。PD_{n-InGaN WG-cond} 或 PD_{EBL-cond} 分别是电子费米能级与 n-InGaN WG 或 AlInGaN EBL 的导带 (Conduction band) 之间的电位差 (Potential difference, PD),阻碍电子泄漏的势垒高度为 PD_{n-InGaN WG-cond} 和 PD_{EBL-cond} 之间的差值。PD_{n-InGaN WG-Vale} 是 n-InGaN WG 层价带费米能级与

AlInGaN EBL 的价带 (Valence band) 之间的电位差;PD_{EBL-Vale} 是 AlGaN-EBL 层价带费米能级与 AlInGaN 势垒层 (Barrier) 价带之间的电位差。空穴注入势垒的高度为 PD_{n-InGaN WG-Vale} 和 PD_{EBL-Vale} 之和。由图 2 四种 EBL 能带电势可知,LD1、LD2、LD3 和 LD4 形成的导带电子势垒高度分别是 2.10, 2.15, 2.05, 2.07 eV。同时,在 EBL 与 InGaN 势垒层界面处,分别形成约 2.80, 2.70, 2.78, 2.72 eV 的空穴价带注入势垒高度。阻碍电子泄漏势垒高度从均匀组分 LD1 的 2.10 eV 提高到 2.15 eV,空穴注入势垒高度从均匀组分 LD1 的 2.80 eV 降低至 2.70 eV,阶梯渐变 EBL 的 LD2 导带电子势垒高度最高,价带空穴势垒高度最低。这说明 Al 组分阶梯渐变 EBL LD2 能有效阻止电子泄漏,提高了空穴注入。这主要是由于空穴注入价带势垒越低越有利于空穴注入,导带电子泄漏势垒高度增加有利于减少电子泄漏,从而增加了量子阱中的电子和空穴辐射复合的几率。

通过分析电流泄漏密度与注入电流的关系验证四种不同 Al 组分渐变 EBL 能带结构对 LD 电子泄漏的影响规律。图 3 是泄漏电流密度与注入电流关系曲线,随着注入电流的增加。泄漏电流密度增加。在电流为 480 mA 时,LD2 的泄漏电流密度最低,这主要是由于 Al 组分阶梯渐变 EBL LD2 有源区中的电子准费米能级提高,有效抑制了电子进入 p 侧^[40],从而减少了电子泄漏;LD3 的泄漏电流密度最高,这是因为 LD3 抑制电子泄漏的导带势垒高度最低,空穴注入价带势垒高度最高,从而导致泄漏电流密度的增加;Al 组分阶梯渐变 EBL 的 LD4 的泄漏电流密度略高于传统均匀组分 EBL 的 LD1,这是由于 LD4 的阻碍电子泄漏的导带势垒高度小于 LD1,同时 LD1 小于 LD2,从而泄漏电流密度低于 LD2 和 LD1。

载流子注入效率是影响 LD 电学性能的重要参数之一。载流子注入效率变化对工作电压有着重要影响,载流子注入效率越高,工作电压越低。因此,需要进一步分析注入电流对电压和载流子注入效率的影响规律。图 4(a) 是不同 Al 组分渐变 EBL 结构电压与注入电流的关系曲线,结果表明,随着注入电流增加,电压增加。当注入电流 480 mA 时,四种 LD 的工作电压从低到高的顺序是 LD4、LD2、LD1、LD3。LD2 的工作电压低于 LD3 和 LD1,这主要是因为 Al 组分阶梯渐变的

LD2 的导带电子泄漏势垒高度增加和价带空穴注入势垒高度降低,降低了载流子泄漏,提高了载流子注入效率,从而降低了工作电压。当注入电流

480 mA 时,LD4 的工作电压最低。这主要是由于 Al 组分阶梯渐变 EBL 的 LD4 导带电子泄漏势垒高度降低,然而空穴注入势垒高度增加,但是空穴

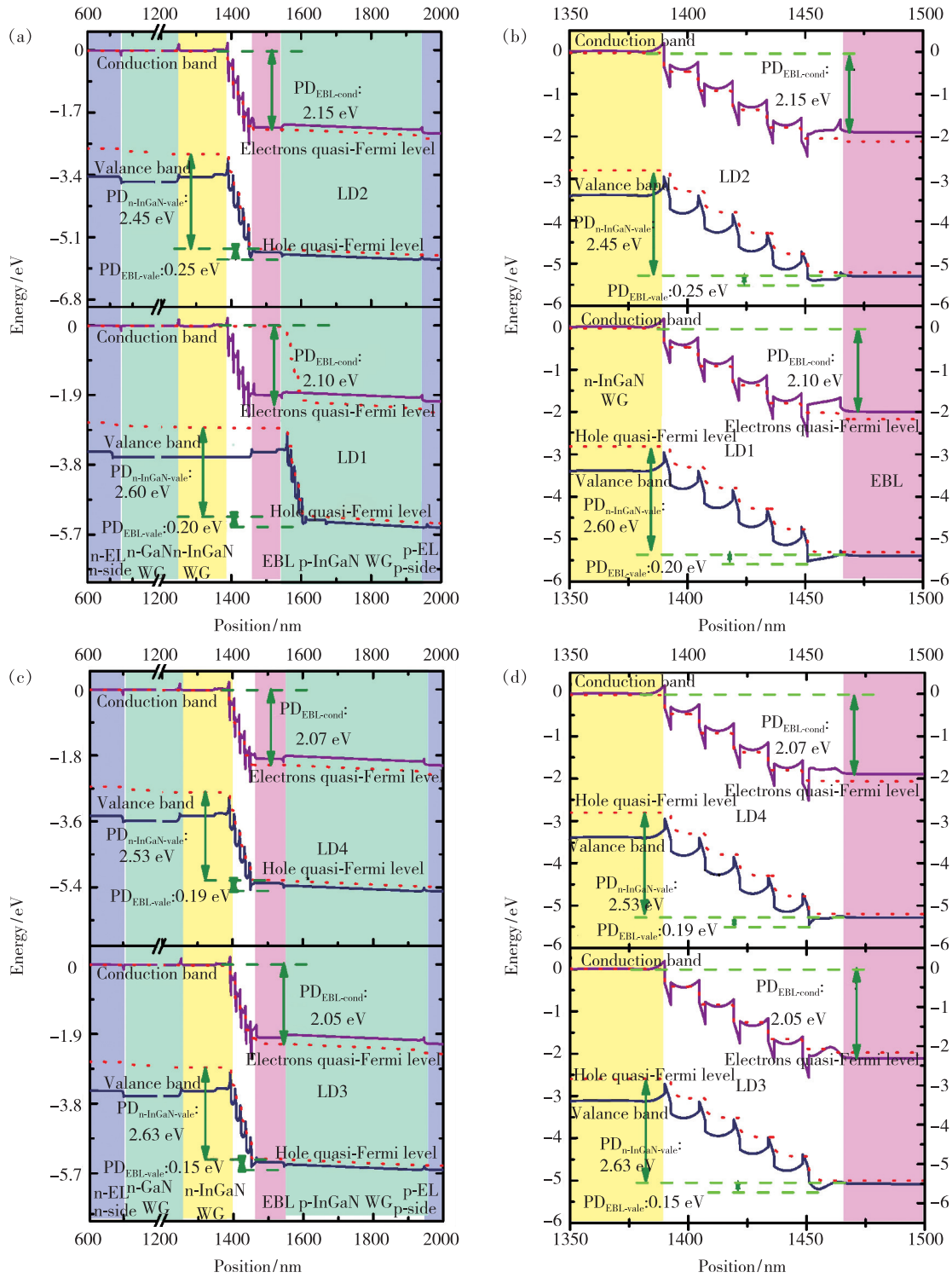


图 2 当注入电流 480 mA (电流密度为 6 kA/cm^2) 时,EBL 不同 Al 组分渐变的能带变化曲线 (图 (b) 是图 (a) 1 350 ~ 1 500 nm 的放大图;图 (d) 是图 (c) 1 350 ~ 1 500 nm 的放大图)。

Fig. 2 The energy band *versus* position of different Al composition-graded EBL structure at injection current 480 mA (injection density 6 kA/cm^2) (Fig. (b) is the magnification of the Fig. (a) from 1 350 nm to 1 500 nm, Fig. (d) is the magnification of the Fig. (c) from 1 350 nm to 1 500 nm)

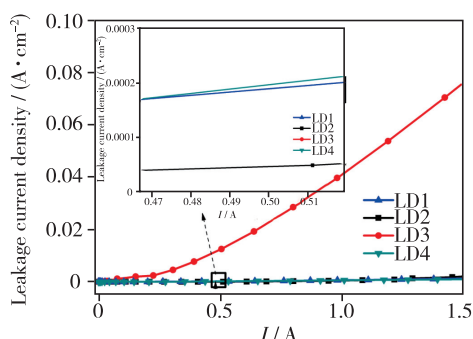


图 3 不同 Al 组分渐变 EBL 下 LD 泄漏电流密度与注入电流关系曲线

Fig. 3 Leakage current density of LD versus the injected current for different Al composition EBL structure

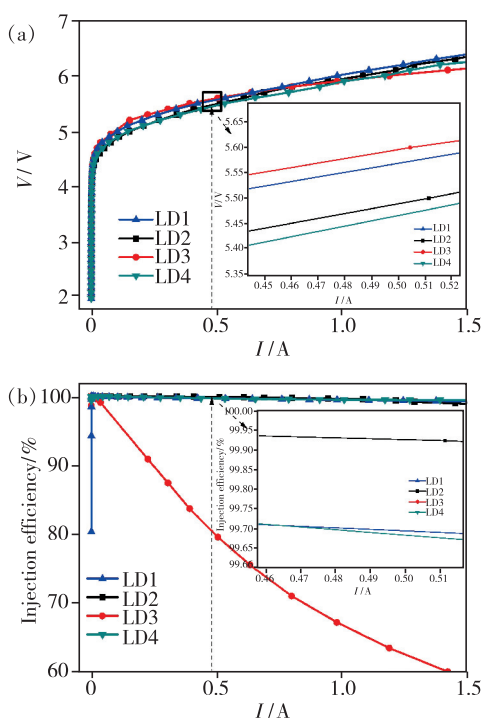


图 4 不同 Al 组分渐变 EBL 下 LD 电压 (a)、注入效率 (b) 与注入电流关系曲线。

Fig. 4 Voltage (a), injection efficiency (b) of LD versus the injected current for different Al composition-graded EBL structure.

注入势垒高度的提高补偿了导带电子泄漏势垒高度降低带来的影响,从而降低了载流子注入效率,进而导致工作电压升高。图 4(b)是载流子注入效率与注入电流关系曲线,结果表明,随着注入电流增加,载流子注入效率提高。当注入电流为 480 mA 时,LD2 的载流子注入效率最高,这主要是由于 Al 组分渐变 EBL 的 LD2 通过调节带隙宽度和 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ EBL 与 p 侧量子阱之间的晶格匹配,减少了电子泄漏,提高了空穴注入有源

区,进而减少了界面缺陷和界面载流子损耗,从而降低了工作电压和提高了载流子注入效率。由于 LD4 的泄露电流密度高于 LD2 和 LD1,从而导致 LD4 的注入效率低于 LD2。当注入电流为 480 mA 时,LD3 的注入效率最低,这主要是由于 LD3 电子泄漏的导带势垒高度降低和空穴注入的势垒高度增加,造成电子泄漏增加和空穴注入效率降低,导致载流子注入效率降低。

通过分析 IQE 与注入电流之间的关系探究 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ EBL Al 组分渐变方式对 GaN 基蓝光 LD IQE 的影响。图 5 是四个不同 Al 组分渐变 EBL 结构 LD 的 IQE 与注入电流关系曲线,结果表明,注入电流小于 500 mA 时,IQE 逐渐增加。当注入电流为 480 mA 时,LD2 的 IQE 最高达到 95.6%,LD1、LD3 和 LD4 的 IQE 分别是 91%、73.5% 和 93.2%。这是因为泄漏电流密度和非辐射复合共同影响 IQE,而 LD2 的泄漏电流密度最低,从而导致 LD2 的 IQE 最高。LD2 的非辐射复合将在下面章节进行分析。因此,阶梯渐变 EBL 结构 LD2 在该注入电流下能够有效抑制载流子泄漏,三角形渐变和传统均匀组分 EBL 结构不能抑制电子从有源区进入 p 侧,造成载流子泄漏严重,泄漏电流密度增加;同时 LD4 泄漏电流密度低于 LD2,载流子注入效率低于 LD2,从而降低了 IQE。因此,LD2 的阶梯渐变 EBL 结构降低了材料的极化效应,提高了空穴注入效率,使空穴在量子阱有源区中的分布更加均匀^[41];同时该结构能抑制电子从有源区进入 p 侧,载流子注入效率提高,从而提高了 IQE。

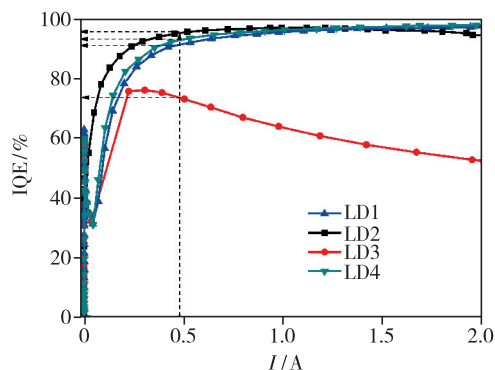


图 5 不同 Al 组分渐变 EBL 下 LD IQE 与注入电流关系曲线

Fig. 5 IQE of LD versus the injected current for different Al composition EBL structure

为了探究非辐射复合对有源区 IQE 的影响,

分别对非辐射复合电流密度、俄歇复合电流密度和 SRH 复合电流密度与注入电流的关系进行了分析,如图 6(a)~(c)。非辐射复合主要包括俄歇复合和 SRH 复合。非辐射复合、俄歇复合和 SRH 复合可以分别通过非辐射复合电流密度、俄歇复合电流密度和 SRH 复合电流密度表征。当注入电流为 480 mA 时,LD2 的非辐射复合电流密度最低,LD1 最高,这主要是由于 Al 组分渐变 EBL 结构降低俄歇复合和 SRH 复合,三角形渐变 EBL 结构不能有效降低俄歇复合和 SRH 复合;LD2 的俄歇复合电流密度最低,LD1 最高,这主要是由于 Al 组分渐变 EBL 结构提高了载流子空穴注入效率,从而降低了俄歇复合电流密度;LD2 的 SRH 复合电流密度最低,LD3 最高,这主要是由于通过采用四元 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ EBL 降低了与靠近 p 侧量子阱之间的晶格失配,降低了极化效应,减少了界面处的缺陷,从而降低了 SRH 辐射复合。其中 LD4 的非辐射复合电流密度、俄歇复合电流密度和 SRH 复合电流密度高于 LD3 和 LD1,但低于 LD2,这主要是由于 LD2 比 LD4 的量子阱中载流子浓度更高、极化效应更低和界面处缺陷更少,从而降低了辐射复合电流密度。阶梯渐变 EBL 结构非辐

射复合最低,俄歇复合最低,SRH 复合最低。LD2 俄歇复合电流密度和 SRH 复合电流密度最低,从而导致 LD2 非辐射复合电流密度最低。因此,LD2 的 IQE 最高主要由于其低非辐射复合率和低泄漏电流密度导致的。非辐射复合电流密度主要受俄歇复合电流密度的影响,当有源区载流子浓度高时,俄歇复合又受有源区载流子浓度的影响。图 6(d)是有源区载流子浓度与注入电流的关系曲线,结果表明,LD2 的有源区载流子浓度最高,LD2 的俄歇复合最低,从而降低了 LD2 的非辐射复合电流密度。这是由于 Al 组分阶梯渐变的 EBL 结构 LD2 能够有效缓解极化效应,提高了载流子注入效率和有源区载流子浓度,使空穴和电子在有源区分布更加均匀,从而降低了非辐射复合电流密度。LD1 的非辐射复合电流密度最高是因为其俄歇复合电流密度和 SRH 复合电流密度高导致。因此,Al 组分阶梯渐变 EBL 的 LD2 能够有效降低泄漏电流密度,增加了注入效率,降低了俄歇复合,增加了有源区载流子浓度,降低了非辐射复合电流密度,从而提高了 IQE。

综上所述,Al 组分阶梯渐变 EBL 结构 LD2 的抑制电子泄漏的导带势垒高度最高,阻碍空穴

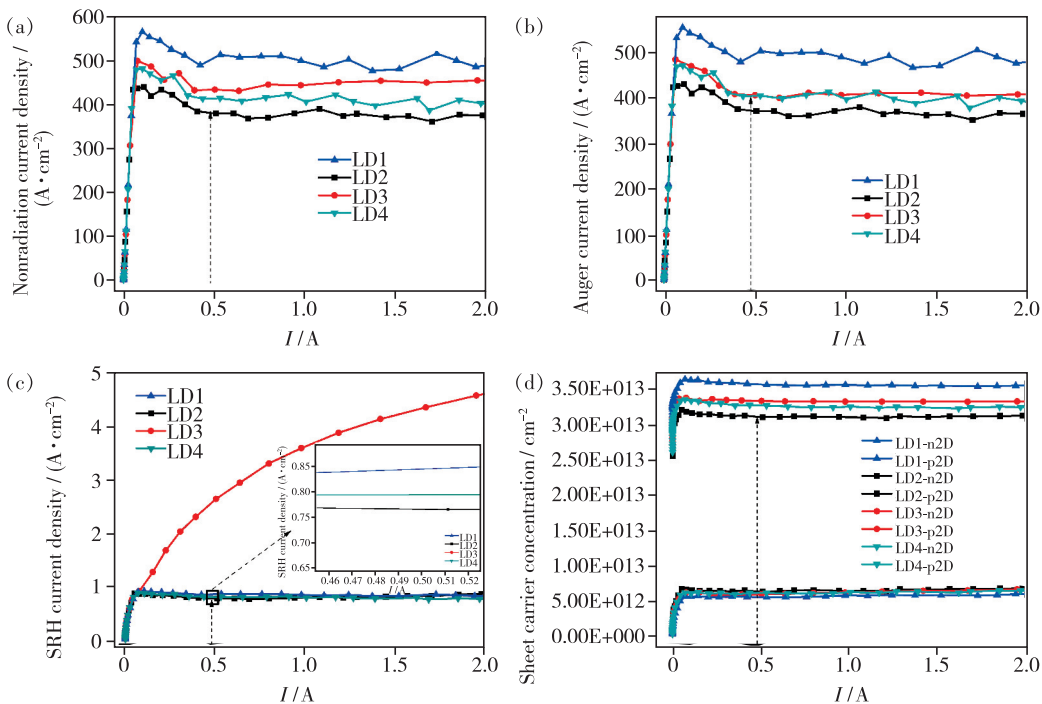


图 6 不同 Al 组分渐变方式 EBL 下 LD 非辐射复合电流密度(a)、俄歇复合电流密度(b)、SRH 复合电流密度(c)、有源区载流子密度(d)与注入电流关系曲线。

Fig. 6 The curves of non-radiative current density(a), Auger current density(b), SRH current density(c) and active region carrier concentration(d) versus injected current at different Al composition EBL structure.

有效注入的价带势垒高度最低; Al 组分阶梯渐变 EBL 结构 LD4 抑制电子泄漏势垒高度低于均匀组分 EBL 结构 LD1, 但是其空穴注入势垒高度低于 LD1; 综合分析, LD2 电学性能最佳, LD4 电学性能低于 LD2 优于 LD3 和 LD1。因此, Al 组分阶梯渐变 EBL 结构提高了电子泄漏的导带势垒高度, 降低了空穴注入的价带势垒高度, 有效抑制了电子泄漏, 促进空穴注入有源区, 降低了非辐射复合和俄歇复合, 增加了有源区载流子浓度, 提高了载流子注入效率, 从而提高了有源区辐射复合效率, 进而提高了 IQE。

3.2 光学性能

由于 LD 外延层中电子和空穴对光子的吸收系数不同, 因此光场分布是影响光子损耗的主要

因素之一^[42-43]。通过分析不同 Al 组分渐变 EBL LD 的光场分布讨论了不同 Al 组分渐变 EBL 结构对 LD 光学性能的影响。图 7 是四个 LD 器件的折射率分布和模拟光场分布。结果表明, 在相同的波导模式下, LD1、LD2、LD3、LD4 的光学限制因子分别是 3.29%、3.50%、3.30%、3.43%, 其中 LD2 的光学限制因子最高, LD2 的光场强度也就最高。LD 光学限制因子的不同是由于采用了不同 Al 组分渐变方式 EBL 导致。由图 7 可知, 阶梯渐变 EBL 结构 LD2 和 LD4 能将光场限制在量子阱内, 减少光场泄漏, 从而提高了光场强度和光增益。因此, Al 组分阶梯渐变 EBL 的 LD 光学限制因子最高, 将光场限制在有源区量子阱中, 减少了光场泄漏, 从而提高了输出功率。

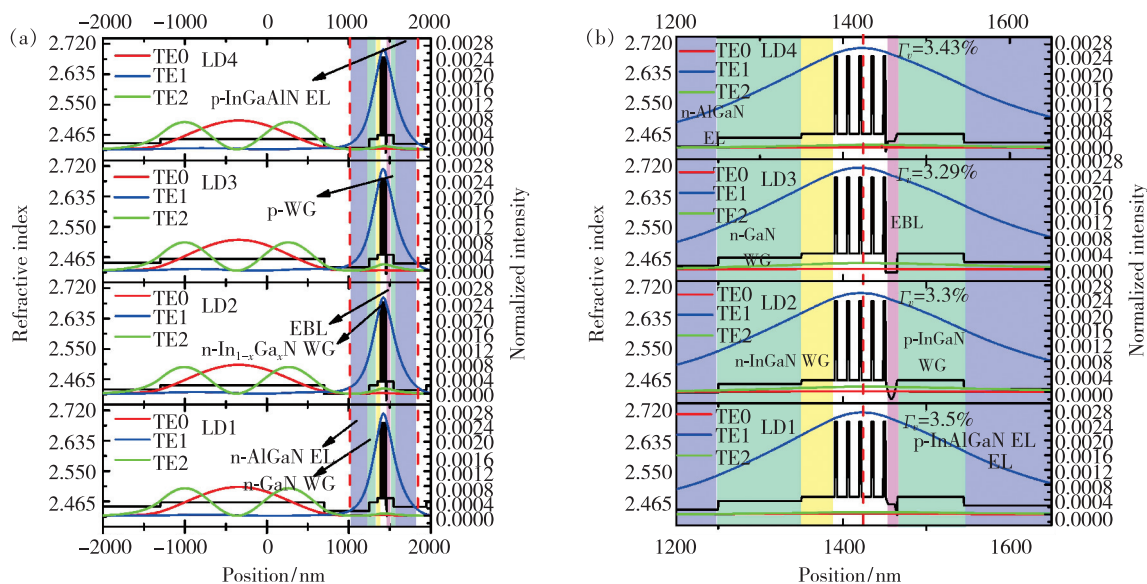


图 7 不同 Al 组分渐变 EBL 下 TE-模的折射率分布和强度分布(图(b)是图(a)1 200 ~ 1 650 nm 的放大图)

Fig. 7 The refractive index profiles and the corresponding optical-field distributions of different Al composition-graded EBL structure (Fig. (b) is the magnification of the Fig. (a) from 1 200 nm to 1 650 nm)

光子损耗是影响 LD 性能的因素之一, 光子内损耗越高, LD 的阈值电流越高, 输出功率越低。这主要是由于自由载流子能够吸收量子阱内外的光子^[43]。为了分析不同 Al 组分渐变 EBL 对 LD 光学损耗的影响, 对外损耗、内损耗和总损耗与注入电流的关系进行了对比分析。图 8(a) ~ (c) 分别是四种不同 Al 组分渐变方式下外损耗 (α_{out})、内损耗 (α_{QW}) 和总损耗 (α_{total}) 与注入电流的关系曲线。由图 8(a) ~ (c) 可知, 当注入电流为 480 mA (电流密度为 6 kA/cm²) 时, 阶梯渐变 EBL 结构 LD2 和 LD4 的外损耗明显低于均匀组分 EBL 结构 LD1 和三角形组分 EBL 结构 LD3, LD2 和

LD4 的内损耗低于 LD1 和 LD3, LD2 和 LD4 的总损耗也明显低于 LD1 和 LD3。这是由于阶梯渐变 EBL 结构提高了载流子注入效率, 降低了阱外非辐射复合, 有效降低了阱外的光子损耗, 同时将光子限制在量子阱内, 降低了量子阱内光子损耗, 从而降低了总损耗。阈值电流是影响 GaN 基蓝光 LD 性能的重要技术参数之一。内部光子损耗高和非辐射复合效率高会导致阈值电流提高, 从而降低了光输出功率和电光转换效率。因此, 对阈值电流进行分析讨论具有很重要的意义。图 8(d) 是四种 LD 的阈值电流, 四种不同 EBL 结构 LD 的阈值电流分别是 43.5, 32.4, 77.2, 45.1 mA。其中

LD2 的阈值电流最小,这主要是由于其量子阱的内和外光损耗以及俄歇复合最小,从而减少了光损耗和载流子损耗。LD3 的阈值电流最大,这主要由于内部光子损耗最大,非辐射复合也较大导致的。这

是由于 LD 的阈值电流与内部光子损耗和非辐射复合有关,内部光子损耗越大,非辐射复合越高,阈值电流越大。LD2 的非辐射复合效率和内部光子损耗最低,从而降低了 LD2 的阈值电流。

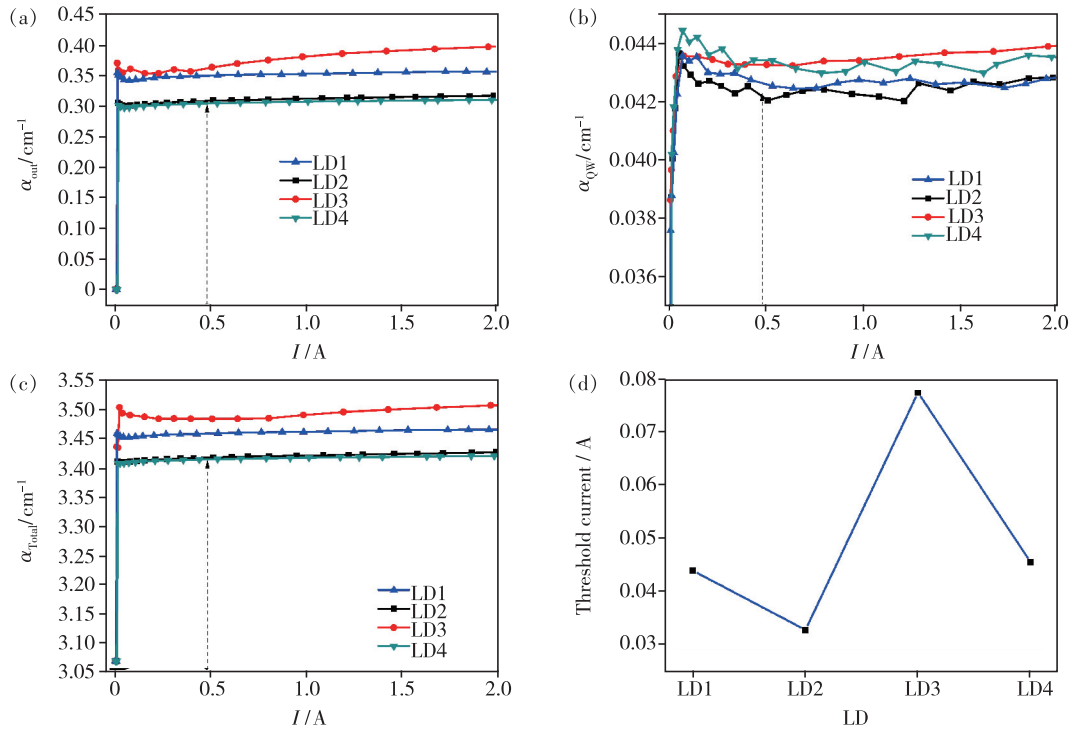


图 8 不同 Al 组分渐变 EBL 下 LD 的多量子阱外(α_{out}) (a)、内(α_{QW}) (b)、总损耗(α_{Total}) (c) 和阈值电流 (d) 随注入电流的变化曲线(箭头所指 0.48 A)。

Fig. 8 The optical loss outside multiple quantum wells(α_{out}) (a), optical loss in multiple quantum wells(α_{QW}) (b), total optical loss(α_{Total}) (c), threshold current (d) of LD with different Al composition-graded EBL structure versus the injected current (The arrow indicates 0.48 A).

为了探究不同 Al 组分渐变 EBL 对输出功率和转换效率的影响,对功率和转换效率与注入电流的关系曲线进行分析,图 9 (a)、(b) 分别是输出功率、转换效率与注入电流的关系曲线。由图 9 (a) 可知,EBL 不同渐变方式下,注入电流增加,输出功率随之增加。在注入电流为 480 mA 时,LD1、LD2、LD3、LD4 的输出功率分别为 335、352、264、350 mW,LD2 的输出功率最高,LD3 的输出功率最低。这是由于 LD2 的电子泄漏低和空穴注入效率高,增加了有源区载流子浓度,提高了有源区辐射复合效率和 IQE,从而提高了 LD2 输出功率。转换效率是衡量 GaN 基蓝光 LD 性能的重要指标。图 9 (b) 是转换效率与注入电流关系曲线,结果表明,随着注入电流增加,转换效率先快速增加,然后缓慢降低。这是因为随着注入电流增加,LD 的损耗增加,功率会逐渐饱和。当注入

电流为 480 mA 时,LD2 光电转换效率最高达 13.4%,LD2 和 LD4 转换效率相同,LD1 为 12.5%,LD3 的最低为 9.97%。这是因为 LD2 泄漏电流密度最低,有源区辐射复合效率最好,IQE 最高,输出功率最高,所以 LD2 的功率转化效率最高。LD4 价带空穴注入势垒高度增加补偿了电子泄漏的问题,提高了 IQE,从而提高了输出功率。LD1 和 LD3 功率转化效率降低相对 LD2 和 LD4 来说不明显,这是由于 LD1 和 LD3 损耗严重,导致转换效率明显下降。因此,采用阶梯渐变 EBL 结构可以明显提高 LD 的电光转换效率。外延层的等效电阻主要是由 p 侧外延层电阻决定,p 侧空穴迁移速度低于 n 侧。因此,EBL 对 LD 工作电压有着重要影响^[44]。基于以上分析可知,工作电压越大,光电转换效率就越小。因此,Al 组分阶梯渐变 EBL LD2 能够通过调控能带结构和光场分

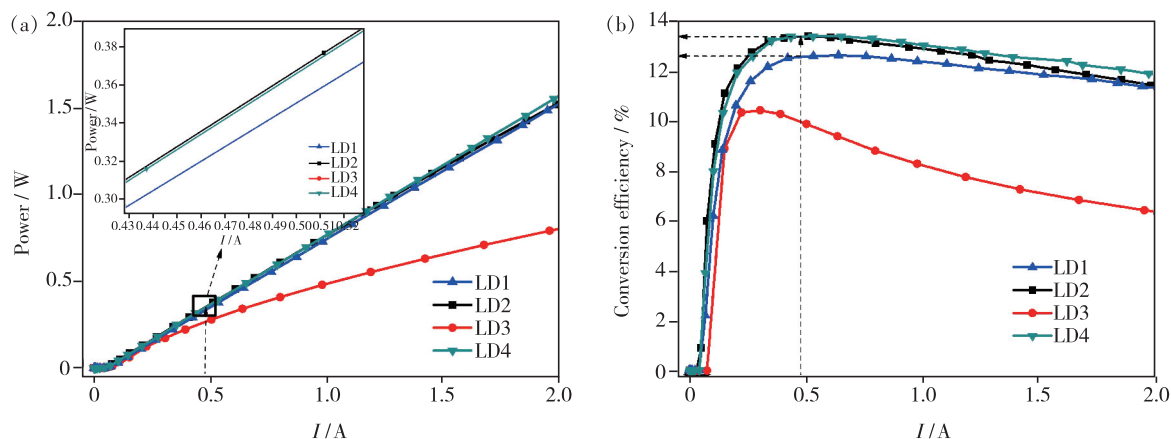


图 9 不同 Al 组分渐变 EBL 下 LD 的功率 (a)、转换功率 (b) 与注入电流关系曲线。

Fig. 9 Simulated power (a) and conversion efficiency (b) of LD with different Al composition-graded EBL structure versus injected current

布,减少电子泄漏和光子损耗,提高载流子注入效率和辐射复合效率,达到降低阈值电流的目的,最终实现高输出功率和高电光转换效率。

4 结 论

本文通过调控量子阱的能带结构降低极化效应,提高了载流子注入效率,从而提高了量子阱中的辐射复合。Al 组分阶梯渐变 EBL 结构通过调节能带结构有效降低空穴注入的价带势垒高度和提高电子泄漏的导带势垒高度,抑制了载流子泄漏,提高了载流子的注入效率,降低了有源区的非辐射复合电流密度,从而提高了 IQE。同时,Al 组分阶梯渐变 EBL 结构通过调节光场分布增加了光场限

制,减少了光子损耗,从而降低了阈值电流。其中,Al 组分阶梯渐变(0~0.07~0.16)EBL 结构相对于另外一种 Al 组分阶梯渐变(0.16~0.07~0)EBL 结构具有更优的光电性能。当注入电流为 480 mA(6 kA/cm²)时,Al 组分阶梯渐变(0~0.07~0.16)EBL 结构 LD 输出功率和电光转换效率分别从 335 mW、12.5% 提高至 352 mW、13.4%。因此,Al 组分右阶梯渐变(0~0.07~0.16)EBL 的 LD 具有最优的光电性能。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://ejl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220016>.

参 考 文 献:

- [1] NAKAMURA S, SENOH M, NAGAHAMA S I, *et al.* InGa_N-based multi-quantum-well-structure laser diodes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, 35(1B): L74-L76.
- [2] MOUSTAKAS T D, PAIELLA R. Optoelectronic device physics and technology of nitride semiconductors from the UV to the terahertz [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2017, 80(10): 106501-1-41.
- [3] SANDHU H K, SHARMA A, JAIN A, *et al.* Efficiency enhancement in InGa_N-based laser diodes using an optimized Al_{0.12}-Ga_{0.88}N electron blocking layer [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2020, 35(10): 105017-1-12.
- [4] PIPREK J, NAKAMURA S. Physics of high-power InGa_N/Ga_N lasers [J]. *IEE Proc-Optoelectron*, 2002, 149(4): 145-151.
- [5] WALTEREIT P, BRANDT O, TRAMPERT A, *et al.* Nitride semiconductors free of electrostatic fields for efficient white light-emitting diodes [J]. *Nature*, 2000, 406(6798): 865-868.
- [6] LAN T, YAO S, ZHOU G Z, *et al.* Effect of strain modification on crystallinity and luminescence of InGa_N/Ga_N multiple quantum wells grown by MOCVD [J]. *Appl. Phys. A*, 2018, 124(9): 619-1-8.
- [7] CHERNS D, HENLEY S J, PONCE F A. Edge and screw dislocations as nonradiative centers in InGa_N/Ga_N quantum well luminescence [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(18): 2691-2693.

- [8] WIERER J J JR, FISCHER A J, KOLESKE D D. The impact of piezoelectric polarization and nonradiative recombination on the performance of (0001) face GaN/InGaN photovoltaic devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(5):051107-1-3.
- [9] KIM M H, SCHUBERT M F, DAI Q, *et al.* Origin of efficiency droop in GaN-based light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(18):183507-1-3.
- [10] WANG J X, WANG L, ZHAO W, *et al.* Understanding efficiency droop effect in InGaN/GaN multiple-quantum-well blue light-emitting diodes with different degree of carrier localization [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(20):201112-1-3.
- [11] PIPREK J. Efficiency droop in nitride-based light-emitting diodes [J]. *Phys. Status Solidi (A) Appl. Mater. Sci.*, 2010, 207(10):2217-2225.
- [12] MEYAARD D S, LIN G B, SHAN Q F, *et al.* Asymmetry of carrier transport leading to efficiency droop in GaInN based light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(25):251115-1-3.
- [13] MIYAJIMA T, YOSHIDA H, YANASHIMA K, *et al.* GaN-based high-power laser diodes [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2001, 82(1-3):248-252.
- [14] HARDY M T, HOLDER C O, FEEZELL D F, *et al.* Indium-tin-oxide clad blue and true green semipolar InGaN/GaN laser diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(8):081103-1-4.
- [15] RYU H Y, HA K H, LEE S N, *et al.* High-performance blue InGaN laser diodes with single-quantum-well active layers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, 19(21):1717-1719.
- [16] MEHTA K, LIU Y S, WANG J L, *et al.* Theory and design of electron blocking layers for III-N-based laser diodes by numerical simulation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2018, 54(6):2001310-1-11.
- [17] PIPREK J, FARRELL R, DENBAARS S, *et al.* Effects of built-in polarization on InGaN-GaN vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2006, 18(1):7-9.
- [18] CHEN J R, LEE C H, KO T S, *et al.* Effects of built-in polarization and carrier overflow on InGaN quantum-well lasers with electronic blocking layers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, 26(3):329-337.
- [19] ZHANG Y, LIU J P, KAO T T, *et al.* Performance enhancement of InGaN-based laser diodes using a step-graded $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ electron blocking layer [J]. *Int. J. High Speed Electron. Syst.*, 2011, 20(3):515-520.
- [20] MORAWIEC E, SARZAŁA R P, NAKWASKI W. A new structure of nitride light-emitting diodes without polarization effects [J]. *Phys. B*, 2012, 407(19):3960-3964.
- [21] ALAHYARIZADEH G, AMIRHOSEINY M, HASSAN Z. Effect of different EBL structures on deep violet InGaN laser diodes performance [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2016, 76:106-112.
- [22] LIN Z T, WANG H Y, CHEN S Q, *et al.* Achieving high-performance blue GaN-based light-emitting diodes by energy band modification on $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ electron blocking layer [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2017, 64(2):472-480.
- [23] XING Y, ZHAO D G, JIANG D S, *et al.* Suppression of electron and hole overflow in GaN-based near-ultraviolet laser diodes [J]. *Chin. Phys. B*, 2018, 27(2):028101-1-6.
- [24] HE L F, ZHANG K, WU H L, *et al.* Efficient carrier transport for 368 nm ultraviolet LEDs with a p-AlInGaN/AlGaN short-period superlattice electron blocking layer [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(25):7893-7899.
- [25] 刘轩, 王美玉, 李毅, 等. 阶梯状量子阱结构对蓝光 GaN 基 LED 性能的改善 [J]. *半导体技术*, 2019, 44(10):767-772.
- LIU X, WANG M Y, LI Y, *et al.* Performance improvement of GaN-based blue LED with step-like quantum well structure [J]. *Semicond. Technol.*, 2019, 44(10):767-772. (in Chinese).
- [26] WANG F, LI S S, XIA J B, *et al.* Effects of the wave function localization in AlInGaN quaternary alloys [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(6):061125-1-3.
- [27] AUMER M E, LEOEUF S F, MCINTOSH F G, *et al.* High optical quality AlInGaN by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(21):3315-3317.
- [28] MONEMAR B. Fundamental energy gap of GaN from photoluminescence excitation spectra [J]. *Phys. Rev. B*, 1974, 10(2):676-681.
- [29] CHENG L W, CAO C R, MA J, *et al.* Suppressed polarization effect and enhanced carrier confinement in InGaN light-emitting diodes with GaN/InGaN/GaN triangular barriers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2018, 123(22):223104-1-4.
- [30] 贾甜甜. GaN 基绿光激光二极管外延结构设计及其光电性能研究 [D]. 太原:太原理工大学, 2021.

- JIA T T. *The Design of the Epitaxial Structure of GaN-based Green Laser Diode and the Research on Photoelectric Performance* [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [31] 胡磊, 张立群, 刘建平, 等. 高功率氮化镓基蓝光激光器 [J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701025-1-6.
HU L, ZHANG L Q, LIU J P, *et al.* High power GaN-based blue lasers [J]. *Chin. J. Laser*, 2020, 47(7): 0701025-1-6. (in Chinese)
- [32] LASTIP User's Manual, Crosslight Inc. LASer technology integrated program [EB/OL]. [2021-08-20]. <http://www.crosslight.ca>.
- [33] LI X, ZHAO D G, JIANG D S, *et al.* Fabrication of ridge waveguide of 808 nm GaAs-based laser diodes by wet chemical etching [J]. *J. Semicond.*, 2015, 36(7): 074009-1-5.
- [34] VURGAFTMAN I, MEYER J R, RAM-MOHAN L R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, 89(11): 5815-5875.
- [35] VURGAFTMAN I, MEYER J R. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 94(6): 3675-3696.
- [36] CHEN C Y, HSIEH C, LIAO C H, *et al.* Effects of overgrown p-layer on the emission characteristics of the InGaN/GaN quantum wells in a high-indium light-emitting diode [J]. *Opt. Express*, 2012, 2(10): 11321-11335.
- [37] KANGAWA Y, ITO T, KOUKITU A, *et al.* Progress in theoretical approach to InGaN and InN epitaxy: in incorporation efficiency and structural stability [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2014, 53(10): 100202-1-11.
- [38] KOZAKI T, MATSUMURA H, SUGIMOTO Y, *et al.* High-power and wide wavelength range GaN-based laser diodes [C]. *Proceedings of SPIE 6133, Novel In-plane Semiconductor Lasers V*, San Jose, 2006: 16-27.
- [39] KATO E, NOGUCHI H, NAGAI M, *et al.* Significant progress in II-VI blue-green laser diode lifetime [J]. *Electron. Lett.*, 1998, 34(3): 282-284.
- [40] RYVKIN B S, AVRUTIN E A. Asymmetric, nonbroadened large optical cavity waveguide structures for high-power long-wavelength semiconductor lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 97(12): 123103-1-6.
- [41] 管婕, 翟阳, 闫大为, 等. 组份渐变电子阻挡层对 InGaN/GaN LED 光电特性的影响 [J]. 微电子学, 2016, 46(5): 711-715.
GUAN J, ZHAI Y, YAN D W, *et al.* Influences of composition-graded electron blocking layer on electrical and optical performances of InGaN/GaN LEDs [J]. *Microelectronics*, 2016, 46(5): 711-715. (in Chinese)
- [42] ERBERT G, BUGGE F, KNIGGE A, *et al.* Highly reliable 75 W InGaAs/AlGaAs laser bars with over 70% conversion efficiency [C]. *Proceedings of SPIE 6133, Novel In-plane Semiconductor Lasers V*, San Jose, 2006: 61330B-1-13.
- [43] PETERS M, ROSSIN V, ACKLIN B. High-efficiency high-reliability laser diodes at JDS Uniphase [C]. *Proceedings of SPIE 5711, High-power Diode Laser Technology and Applications III*, San Jose, 2005: 142-151.
- [44] CRUMP P, WANG J, CRUM T, *et al.* 360 W and > 70% efficient GaAs-based diode lasers [C]. *Proceedings of SPIE 5711, High-power Diode Laser Technology and Applications III*, San Jose, 2005: 21-29.



杜小娟(1997 -), 女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 2015 年于南京工程学院获得学士学位, 主要从事光电材料与器件方面的研究。
E-mail: 1731616735@qq.com



梁建(1964 -), 男, 山东潍坊人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 2005 年于太原理工大学获得博士学位, 主要从事新型半导体材料与器件的研究。
E-mail: liangj1220@.126.com



董海亮(1984 -), 男, 山东菏泽人, 博士, 高级实验师, 硕士生导师, 2016 年于太原理工大学获得博士学位, 主要从事光电材料与器件方面的研究。
E-mail: dhltyut@163.com