

激光与光电子学进展

InGaN 基蓝光激光器 p 型波导层和有源区优化研究

石澜, 李书平*

厦门大学物理科学与技术学院, 福建 厦门 361005

摘要 为了进一步提升蓝光激光器的性能,基于实验样品结构,详细研究了不同结构的 p 型波导层和有源区的组合对 InGaN 基边发射蓝光激光器性能的影响。利用 PICS3D 软件模拟计算其光输出功率-电流-电压特性曲线、能带结构、载流子电流密度分布、激射复合率等光电特性。结果表明,In 组分渐变的 p 型波导层和前两个量子垒层、最后一个量子垒层使用 AlGaN 材料的新结构,可以很好地抑制电子泄漏,增加空穴注入,提高受激辐射复合率,从而提升蓝光激光器的发光效率。在 1.5 A 注入电流下,新结构的光输出功率可达 2.69 W, 相较标准结构提升了 47.8%。

关键词 激光器; 蓝光激光器; InGaN; 波导层; 有源区

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222235

Research on Optimization of p-Type Waveguide Layer and Active Region of InGaN-Based Blue Laser Diodes

Shi Lan, Li Shuping*

College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China

Abstract In order to further improve the performance of blue laser, the influence of the combination of p-type waveguide layer and active region on the performance of InGaN-based edge-emitting blue laser is studied in detail based on the experimental sample structure. Simulation software named PICS3D is used to simulate these blue lasers and to compare their electrical and optical characteristics including light output power-current-voltage characteristic curve, band structures, carrier current density distributions, and stimulated recombination rates. The results show that by using the novel structure of In-composition graded p-type waveguide and the first two quantum barriers, and the last quantum barrier uses the AlGaN material, the blue laser diode can restrain the electron leakage, increase the hole injection and stimulated recombination rate, and thus improve the performance of blue laser diodes. Under 1.5 A injection current, the light output power can reach 2.69 W, which is 47.8% higher than the standard structure.

Key words lasers; blue laser; InGaN; waveguide layer; active region

1 引言

基于 GaN 的蓝色激光二极管(LD)在显示器、照明、量子技术、光学时钟、医疗仪器、材料加工、水下通信和检测等方面具有应用潜力,得到了研究人员的广泛关注^[1-6]。相比具有 5~10 对量子阱的发光二极管(LED)^[7],激光二极管通常采用 1~3 对量子阱^[8],这是因为激光发射需要粒子数反转,而过多的量子阱就需要很高的载流子注入来激活每个量子阱,造成较高的

阈值电流。但由于热化不足或捕获效率低,较少的量子阱会导致 LD 的载流子泄漏更加严重^[9-10]。此外,在 InGaN 材料中存在极化效应,导致能带倾斜,这不仅在空间上分离了注入的载流子,造成量子限制斯塔克效应^[11-12],而且降低了电子有效势垒高度,从而减少了对载流子的限制^[13]。为了增强 GaN 基 LD 的载流子约束,不同课题组纷纷开展研究,例如:Le 等^[14]在电子阻挡层(EBL)之前插入一层薄薄的无掺杂 InGaN 层来抑制电子泄漏;Liang 等^[15]利用非对称多量子阱

收稿日期: 2022-08-04; 修回日期: 2022-09-05; 录用日期: 2022-09-13; 网络首发日期: 2022-09-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0400801, 2016YFB0400800)

通信作者: *lsp@xmu.edu.cn

(MQW) 和 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 低波导层来提高 GaN 基蓝色 LD 的斜率效率; Hou 等^[16]研究了阶梯掺杂低波导层对蓝紫光 LD 性能的影响; Liang 等^[17]使用不带第一层量子垒的多量子阱提高了电子注入比并降低了光损耗; Zhou 等^[18]使用阶梯式薄 InGa_xN 量子势垒显著降低了效率下降; Liu 等^[19]通过调整第一势垒掺杂以增强载流子约束和辐射复合。在蓝光 LD 中, p 型波导层位于有源区和 EBL 之间^[20], 因而相比 EBL, 波导层或有源区的结构设计对蓝光 LD 的性能提升效果会更加明显。

本文在 Zhong 等^[21]制备的蓝光 LD 样品的基础上, 对 p 型波导层和有源区进行结构优化, 使用模拟计算软件 PICS3D 分析其光电特性、能带结构、载流子电流密度分布、激射复合率等, 结果表明, In 组分线性递增 p 型波导层、前两个量子垒层 In 组分渐变、最后一个量子垒层使用 AlGa_xN 材料的结构可以抑制电子泄漏, 增加空穴注入, 提高蓝光 LD 的发光效率。

2 实验仿真

本文运用 PICS3D 软件模拟计算时所采用的蓝光

LD 结构示意图如图 1 所示, 对其进行模型构建, 标准结构从下往上依次为: 60 μm 厚的 n 型 GaN 衬底, 2 μm 厚的 n 型 GaN 缓冲层, 1.2 μm 厚的 n 型 $\text{Al}_{0.068}\text{Ga}_{0.932}\text{N}$ 电子延迟层, 0.2 μm 厚的 n 型 GaN 覆盖层, 0.25 μm 厚的 n 型 $\text{In}_{0.028}\text{Ga}_{0.972}\text{N}$ 下波导层, 以上掺杂浓度皆为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 有源区为两个周期的多量子阱, 由 3 个厚度为 6.7 nm 的 $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 势垒和 2 个厚度为 2.5 nm 的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 势阱构成; 上波导层为 0.25 μm 厚的 p 型 $\text{In}_{0.028}\text{Ga}_{0.972}\text{N}$, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 接下来是 p 型 EBL, 为 20 nm 厚的 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$, 掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; p 型覆盖层为 60 个周期的超晶格结构, 垒层为 2.5 nm 厚的 $\text{Al}_{0.048}\text{Ga}_{0.952}\text{N}$, 阱层为 3.5 nm 厚的 GaN, 掺杂浓度皆为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 最后是 50 nm 厚的 p 型 GaN 接触层, 前 40 nm GaN 的掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 为了更好地实现电极的欧姆接触, 后 10 nm GaN 的掺杂浓度被提高到 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。整个器件的腔长为 1200 μm , 脊宽为 15 μm , 接触电极设置为欧姆接触, 谐振腔的端面反射率为 0.05 和 0.99^[21], 分别对应增透膜和高反射薄膜。

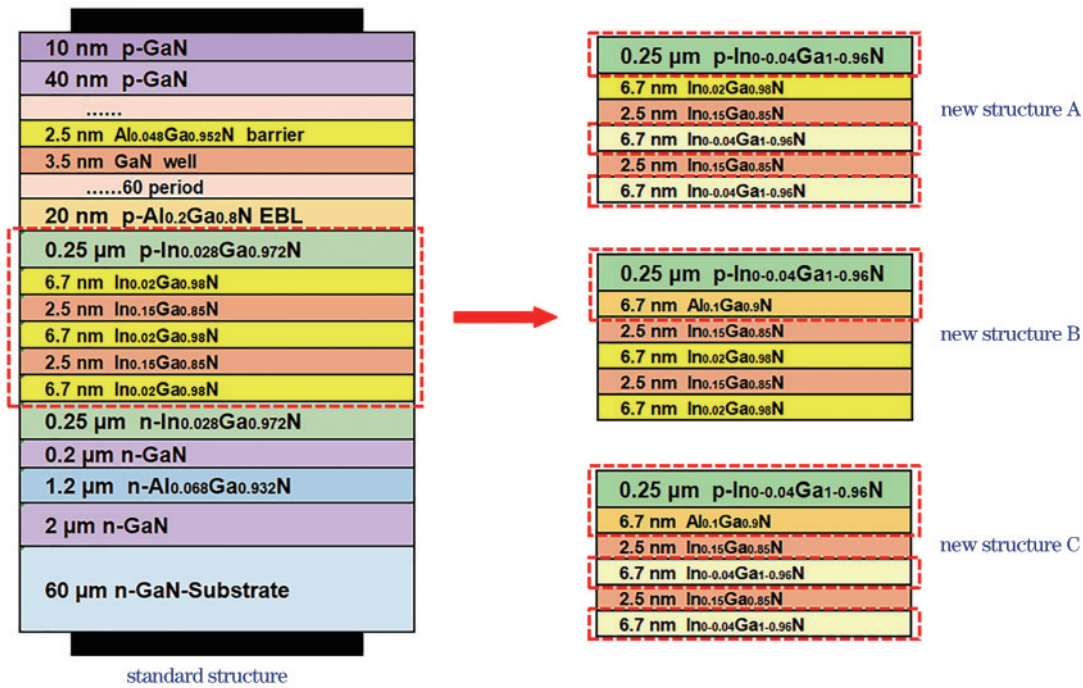


图 1 蓝光 LD 标准结构与新结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of blue LD standard structure and new structure

模拟计算中, 本文将 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合寿命、俄歇复合系数分别设为 1.5 ns ^[22] 和 $1 \times 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$ ^[23]。由于缺陷和自由载流子的存在, 表面电荷可能被屏蔽, 通常从实验测量得到的表面电荷量小于理论值^[24], 因而将屏蔽因子设为 30%^[25]。利用自洽薛定谔-泊松方程和偏振工程理论, 运用包含偏移扩散和偏振模型的一维薛定谔-泊松求解器^[26], 可以计算 LD 的能带分布和载流子分布, 带偏率设为 0.65^[27]。

图 2 为该结构在本文中得到的光输出功率-电流-

电压 ($L-I-V$) 特性曲线模拟结果与参考文献中相似结构的 $L-I-V$ 特性曲线实验结果对比。可以看出, 模拟计算值与实验测量值的 $L-I-V$ 特性曲线趋势基本一致。由参考文献实验数据计算得到的阈值电流为 227.7 mA, 本文模拟得到的阈值电流为 221.3 mA, 相对误差约为 2.8%。另外, 在 1.5 A 注入电流下, 参考文献实验得到的电致发光波长是 444.9 nm^[21], 本文模拟得到的电致发光波长是 445.5 nm, 相对误差约为 0.13%, 说明本文的模拟结果是可靠的。

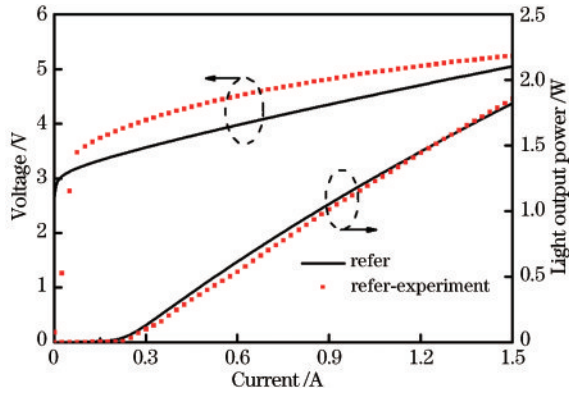


图2 标准结构的模拟和实验 $L-I-V$ 特性曲线对比
Fig. 2 Simulated and experimental $L-I-V$ curves of standard structures

在此基础上,提出了三种新结构,如图1所示。三种新结构均将原结构 $0.25 \mu\text{m}$ 厚的 p 型 $\text{In}_{0.028}\text{Ga}_{0.972}\text{N}$ 波导层替换为 In 组分 $0 \sim 0.04$ 递增的线性渐变结构,掺杂浓度不变。三种新结构的差别在于有源区:新结构 A 仅将有源区前两个势垒层替换为 In 组分 $0 \sim 0.04$ 渐变的平均组分为 0.02 的结构,最后一层量子垒层 (LQB) 不变;新结构 B 仅将 LQB 替换成 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 材料,前两个势垒层不变;新结构 C 则是既将前两个势垒层替换为 In 组分 $0 \sim 0.04$ 渐变,又将 LQB 替换成 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 材料。

3 分析与讨论

由 PICS3D 模拟计算所得到的标准结构与三种新结构的 $L-I-V$ 特性曲线图如图3所示,在本文计算中注入电流从 0 A 逐渐增加到 1.5 A ,表1中列出了四种结构的阈值电压、阈值电流、斜率效率和 1.5 A 下的光输出功率。显而易见,在相同的电注入条件下,三种新结构的光输出功率都有明显提升。在 1.5 A 的注入电流

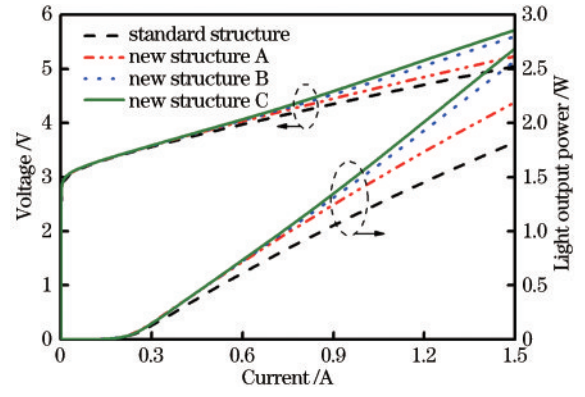


图3 标准结构和三种新结构的 $L-I-V$ 特性曲线
Fig. 3 $L-I-V$ characteristic curves of standard structure and three new structures

下:新结构 A 的光输出功率为 2.19 W ,比标准结构的 1.82 W 提升了 20.3% ;新结构 B 的光输出功率为 2.58 W ,相较标准结构提升了 41.7% ;新结构 C 的光输出功率达到 2.69 W ,相较标准结构提升了 47.8% 。对功率-电流特性曲线进行线性拟合或者求导可以求出四种结构的斜率效率分别为 1.40 W/A 、 1.69 W/A 、 2.01 W/A 和 2.11 W/A ,增长趋势与幅度与光输出功率一致。线性拟合同时可以求得三种结构的阈值电流分别为 221.3 mA 、 220.0 mA 、 224.3 mA 和 225.4 mA ,根据阈值电流可以在相应的 $I-V$ 特性曲线中确定出三种结构的阈值电压,如表1所示。四种结构的阈值特性总体相差不大,新结构 B 和新结构 C 的阈值电流和阈值电压略大于标准结构,这是因为新结构 B 和新结构 C 的最后一层量子垒层都由 $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 替换为了 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$,增大了激光器的总电阻。由于新结构 C 阈值特性的下降都在 2% 以内,而其斜率效率比起标准结构有将近 50% 的提升,相比之下,新结构 C 无疑具有最优异的性能。

表1 四种结构的光电特性

Table 1 Photoelectric characteristics of four structures

Structure	Threshold voltage /V	Threshold current /mA	Slope efficiency / $(\text{W} \cdot \text{A}^{-1})$	Light output power /W
Standard structure	3.44	221.3	1.40	1.82
New structure A	3.44	220.0	1.69	2.19
New structure B	3.46	224.3	2.01	2.58
New structure C	3.46	225.4	2.11	2.69

图4是 1.5 A 电流注入下四种结构的激光光谱图,以及计算出的峰值波长和半峰全宽(FWHM)。可以看出:标准结构的波长为 445.549 nm ,FWHM 为 0.240 nm ;新结构 A 的波长为 445.819 nm ,FWHM 为 0.210 nm ;新结构 B 的波长为 444.238 nm ,FWHM 为 0.182 nm ;新结构 C 的波长为 445.047 nm ,FWHM 为 0.178 nm 。FWHM 的值表示了有源区内光跃迁能的均匀性,FWHM 越小,激光器性能越好^[17]。三种新结构的 FWHM 与标准结构相比都有不同程度的减小,

说明 In 组分渐变递增的 p 型波导层和前两层量子垒、最后一个量子垒层使用 AlGaIn 材料等结构设计都能提高蓝光 LD 的发光效率。另外,由于层间晶格失配所产生的应力的影响^[28],虽然本文改动针对的是 p 型波导层和量子垒层,但也会影响到量子阱,从而略微影响波长。新结构 A 的波长相较标准结构红移了 0.270 nm ,新结构 B 的波长蓝移了 1.311 nm ,新结构 C 的波长蓝移了 0.502 nm 。新结构 A 的波长偏移量最小,但其对激光器性能提升的效果远不如新结构 B 和新结构 C;

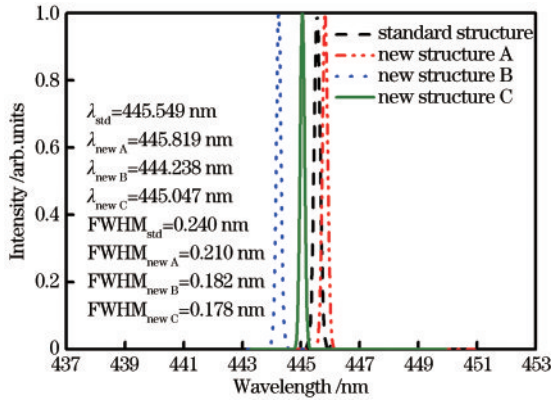


图 4 1.5 A 电流注入下标准结构和三种新结构的激光光谱图
Fig. 4 Lasing spectra of standard structure and three new structures at current of 1.5 A

新结构 B 的性能虽然提升较大,但蓝移相对严重;相比之下,新结构 C 兼顾了较小的波长偏移量和最好的发光效率,无疑是最优结构。

为了探究新结构 C 性能提升的原因,本文绘制了 1.5 A 电流注入下标准结构和新结构 C 的能带结构图,如图 5 所示,图中灰色区域表示有源区。可以看到,在标准结构中,电子从有源区泄漏到 p 型波导层所需的能量,即导带中的电子有效势垒高度 ΔE_c 为 198 meV,新结构 C 的 ΔE_c 为 413 meV。电子有效势垒高度越高,代表有源区对电子的限制作用越强,因此,新结构 C 能够更加有效地阻止电子泄漏到 p 型层。

图 6(a)和(b)是标准结构和新结构 C 在 1.5 A 电流注入下的电子、空穴电流密度分布,图中灰色区域表示有源区。由于电子和空穴会在量子阱受激辐射复合发光,所以电子和空穴电流密度在每个量子阱部分都会减小,图中呈现的电流密度曲线在量子阱区域是阶梯状变化的。可以看出,新结构 C 能很大程度地降低电子泄漏电流,同时,由于泄漏的电子会在 p 型层和空穴发生复合从而影响空穴注入,因而新结构 C 也会相对增加空穴注入。

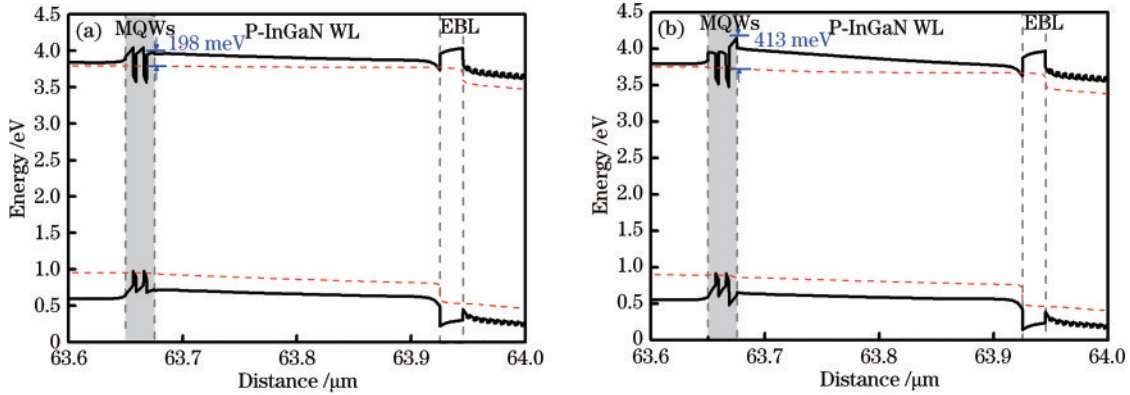


图 5 1.5 A 电流注入下的能带图。(a)标准结构;(b)新结构 C
Fig. 5 Energy band diagrams at current of 1.5 A. (a) Standard structure; (b) new structure C

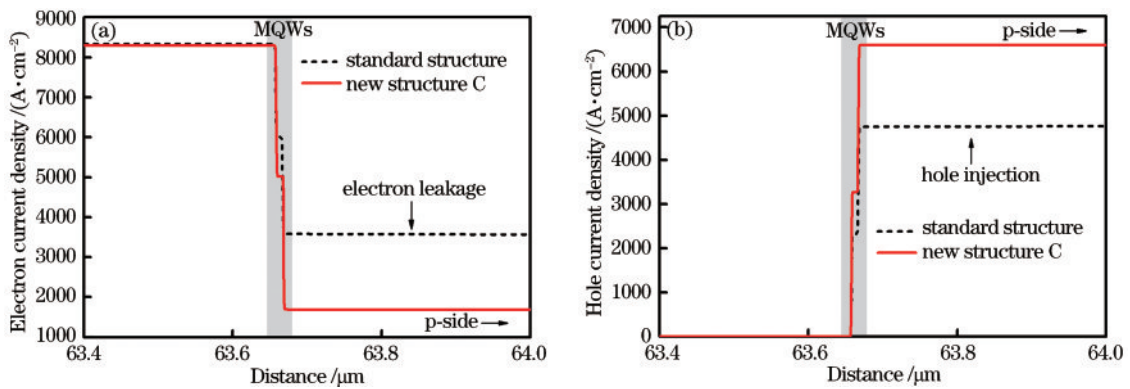


图 6 1.5 A 电流注入下标准结构和新结构 C 的载流子电流密度。(a)电子电流密度;(b)空穴电流密度
Fig. 6 Carrier current density of standard structure and new structure C at current of 1.5 A. (a) Electron current density; (b) hole current density

图 7 是 1.5 A 电流注入下标准结构和新结构 C 的受激辐射复合率,图中灰色区域表示有源区。可以看出,新结构 C 的受激辐射复合率明显高于标准结构,相

比于标准结构提升了 48.6%,这更直观地证明了新结构 C 可以将更多的载流子限制在量子阱中受激辐射复合发光,从而提升蓝光 LD 的发光效率。

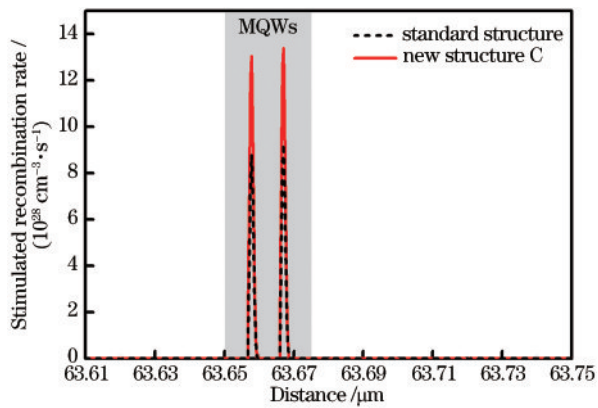


图7 1.5 A 电流注入下标准结构和新结构 C 的受激辐射复合率
Fig. 7 Stimulated recombination rate of standard structure and new structure C at current of 1.5 A

4 结 论

本文在实验样品结构基础上,提出了 In 组分线性递增 p 型波导层以及前两个量子垒层 In 组分渐变、最后一个量子垒层使用 AlGaIn 材料的综合设计。模拟结果表明,新结构可以很好地抑制电子泄漏,增加空穴注入,提高量子阱内的受激辐射率,从而提高蓝光激光器的发光效率,在 1.5 A 注入电流下,新结构的光输出功率可达 2.69 W,相较标准结构提升了 47.8%。本文的模拟结果对后续的实验具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Tian A Q, Hu L, Zhang L Q, et al. Design and growth of GaN-based blue and green laser diodes[J]. *Science China Materials*, 2020, 63(8): 1348-1363.
- [2] Murayama M, Nakayama Y, Yamazaki K, et al. Watt-class green (530 nm) and blue (465 nm) laser diodes[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2018, 215(10): 1700513.
- [3] Monavarian M, Rashidi A, Fezell D. A decade of nonpolar and semipolar III-nitrides: a review of successes and challenges[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2018, 216(1): 1800628.
- [4] 李晋闽, 刘志强, 魏同波, 等. 中国半导体照明发展综述[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0116002.
Li J M, Liu Z Q, Wei T B, et al. Development summary of semiconductor lighting in China[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0116002.
- [5] Kothuru A, Goel S. Leveraging 3-D printer with 2.8-W blue laser diode to form laser-induced graphene for microfluidic fuel cell and electrochemical sensor[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(3): 1333-1340.
- [6] 孙天宇, 夏明俊, 乔雷. 半导体激光器失效机理与检测分析研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1900003.
Sun T Y, Xia M J, Qiao L. Failure mechanism and detection analysis of semiconductor laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1900003.
- [7] Jia C Y, Yu T J, Lu H M, et al. Performance improvement of GaN-based LEDs with step stage InGaIn/GaN strain relief layers in GaN-based blue LEDs[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8444-8449.
- [8] Liu J X, Wang J, Sun X J, et al. Performance improvement of InGaIn-based laser grown on Si by suppressing point defects[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25943-25952.
- [9] Grupen M, Hess K. Simulation of carrier transport and nonlinearities in quantum-well laser diodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(1): 120-140.
- [10] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0114001.
Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0114001.
- [11] Tsai Y C, Bayram C, Leburton J P. Effect of auger electron-hole asymmetry on the efficiency droop in InGaIn quantum well light-emitting diodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2022, 58(1): 3300109.
- [12] Roy S, Ahsan S M T, Mondol N, et al. Comparative investigation into key optoelectronic characteristics of semipolar InGaIn blue laser diodes: a strategy to mitigate quantum-confined stark effect[J]. *Results in Physics*, 2022, 34: 105246.
- [13] Ikeda M, Zhang F, Zhou R L, et al. Thermionic emission of carriers in InGaIn/(In)GaIn multiple quantum wells[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(SC): SCCB03.
- [14] Le L C, Zhao D G, Jiang D S, et al. Suppression of electron leakage by inserting a thin undoped InGaIn layer prior to electron blocking layer in InGaIn-based blue-violet laser diodes[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10): 11392-11398.
- [15] Liang F, Zhao D G, Jiang D S, et al. Improvement of slope efficiency of GaN-based blue laser diodes by using asymmetric MQW and In_{0.2}Ga_{0.8}N lower waveguide[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 731: 243-247.
- [16] Hou Y F, Zhao D G, Liang F, et al. Performance improvement of GaN-based blue and ultraviolet double quantum well laser diodes by using stepped-doped lower waveguide[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, 121: 105355.
- [17] Liang F, Zhao D G, Liu Z S, et al. Improved performance of GaN-based blue laser diodes using asymmetric multiple quantum wells without the first quantum barrier layer[J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 9913-9923.
- [18] Zhou K, Ikeda M, Liu J P, et al. Remarkably reduced efficiency droop by using staircase thin InGaIn quantum barriers in InGaIn based blue light emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(17): 173510.
- [19] Liu J X, Qie H R, Sun Q, et al. Enhanced carrier confinement and radiative recombination in GaN-based lasers by tailoring first-barrier doping[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 32124-32131.

- [20] Liang F, Zhao D G, Liu Z S, et al. GaN-based blue laser diode with 6.0 W of output power under continuous-wave operation at room temperature[J]. *Journal of Semiconductors*, 2021, 42(11): 70-72.
- [21] Zhong Z B, Lu S Q, Li J C, et al. Design and fabrication of high power InGaN blue laser diode over 8 W[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 139: 106985.
- [22] Goudon T, Miljanović V, Schmeiser C. On the Shockley-read-hall model: generation-recombination in semiconductors[J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2007, 67(4): 1183-1201.
- [23] Brendel M, Kruse A, Jönen H, et al. Auger recombination in GaInN/GaN quantum well laser structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(3): 031106.
- [24] Fiorentini V, Bernardini F, Ambacher O. Evidence for nonlinear macroscopic polarization in III-V nitride alloy heterostructures[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(7): 1204-1206.
- [25] Li X, Zhao D G, Jiang D S, et al. The effectiveness of electron blocking layer in InGaN-based laser diodes with different indium content[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2016, 213(8): 2223-2228.
- [26] Li C K, Piccardo M, Lu L S, et al. Localization landscape theory of disorder in semiconductors. III. Application to carrier transport and recombination in light emitting diodes[J]. *Physical Review B*, 2017, 95(14): 144206.
- [27] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(11): 5815-5875.
- [28] Moustakas T D, Paiella R. Optoelectronic device physics and technology of nitride semiconductors from the UV to the terahertz[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2017, 80(10): 106501.