

激光与光电子学进展

基于双凹型波导层的深紫外激光二极管辐射复合特性

许愿¹, 魏士钦¹, 张鹏飞¹, 王瑶¹, 王芳^{1,2*}, 刘玉怀^{1,2,3,4**}¹郑州大学信息工程学院电子材料与系统国际联合研究中心, 河南 郑州 450001;²郑州大学传感器研究院, 河南 郑州 450001;³郑州唯独电子科技有限公司, 河南 郑州 450001;⁴郑州大学产业技术研究院有限公司, 河南 郑州 450001

摘要 本文提出利用双凹波导层来改善深紫外(DUV)激光二极管(LDs)的辐射复合特性。利用Crosslight软件对四种不同的波导层结构进行了仿真研究。结果表明,双凹下波导层的引入提高了空穴的有效势垒高度,有效地抑制了空穴从多量子阱(MQW)区的泄漏,增加了MQW区载流子的浓度。优化后的结构辐射复合率显著提升,具有更好的P-I特性和光学约束因子,为提高DUV LDs的性能提供了一个有效的解决方案。

关键词 激光器与激光光学; 深紫外激光二极管; AlGaIn; 上波导层; 下波导层; 辐射复合速率

中图分类号 O472

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221705

Deep-Ultraviolet Laser-Diode Radiation Recombination Properties Based on Double-Concave Waveguide Layers

Xu Yuan¹, Wei Shiqin¹, Zhang Pengfei¹, Wang Yao¹, Wang Fang^{1,2*}, Liu Yuhuai^{1,2,3,4**}¹National Center for International Joint Research of Electronic Materials and Systems, School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;²Research Institute of Sensors, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;³Zhengzhou Way Do Electronics Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001, Henan, China;⁴Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract This paper proposes the use of double-concave waveguide layers for improving the radiative recombination characteristics of deep-ultraviolet (DUV) laser diodes (LDs). Simulation studies of four waveguide layer structures are performed using the Crosslight software. The results indicate that introducing a double-concave lower-waveguide layer improves the effective barrier height of the holes, effectively suppresses the leakage of holes from the multiple-quantum-well (MQW) region, and increases the concentration of carriers in the MQW region. The optimized structure enhances the radiative recombination rate and exhibits improved P-I characteristics and optical confinement factor, providing an effective solution for enhancing the performance of DUV LDs.

Key words laser and laser optics; deep ultraviolet laser diodes; AlGaIn; upper waveguide layer; lower waveguide layer; radiation recombination rate

1 引言

基于半导体的深紫外激光二极管(DUV LDs)具有广泛的应用前景,如应用于空气净化、医疗设备消

毒、蛋白质识别、生化传感、紫外固化和材料加工^[1-4]。紫外激光具有波长短、产生的热影响区小、精度高的特点,在微加工过程中对材料尺寸形状要求小,可实现对精密复杂结构的加工。紫外线C(UV-C)光谱(<280 nm)能

收稿日期: 2022-05-26; 修回日期: 2022-06-29; 录用日期: 2022-07-26; 网络首发日期: 2022-08-05

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFE0118400)、郑州市1125科技创新项目(ZZ2018-45)、宁波市重大科技创新专项(2019B10129)

通信作者: *iefwang@zzu.edu.cn; **ieyhliu@zzu.edu.cn

够通过改变微生物的核酸来破坏其 DNA 或 RNA,使其繁殖能力部分或完全受损^[5-7],这对于抗击目前流行的冠状病毒具有巨大的意义。虽然 UV-C 发光二极管(LED)在这一领域的应用处于领先地位,但 DUV LDs 具有功率密度高和光方向性好的优势,有大规模消毒和将消毒范围扩大到空气的潜力。同时 LED 尺寸大、成本高、效率低的问题限制了其在深紫外波段的广泛应用^[8],相对地,半导体 LDs 具有尺寸小、成本低、转换效率高、功率高和易集成等优点^[9]。由于其优秀的能带调谐能力,具有中或高铝组分的三元 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 合金是在深紫外波段最有前景的光电材料之一。然而,在 UV-C 范围内实现高效率的 AlGaIn 基 LDs 仍旧面临许多挑战。一方面,器件在生长过程中的高位错密度和点缺陷会导致高电子泄露,抑制有源区的辐射复合^[10];另一方面,p 型 AlGaIn 中的 Mg 掺杂剂的活化能会随 Al 含量的增高而增高,这会削弱半导体激光器 p 型区的导电性和有源区的空穴注入效率^[11-12]。除此以外,由于电子的有效质量要远小于空穴的有效电子质量,导致前者的迁移率要高于后者,部分电子会穿过有源区流入 p 型区^[13]。高 Al 组分的 AlGaIn 材料具有的强极化电场会使能带弯曲变形,产生量子限制斯塔克效应(QCSE),导致电子和空穴波函数重叠率变低^[14]、复合概率变小。这些问题的存在影响了 DUV LDs 光电性能的提升。许多方法已经被用来解决上述问题。例如,使用阶梯式分级量子势垒(QB),提高了 DUV LDs^[15]的光功率,降低了阈值电流;为了降低压电势,抑制电场泄漏,引入了一种分级的 n 型波导层来增强 LDs^[16-17]的光学约束;为了减少电子泄漏和提高空穴注入效率,还引入了各种电子阻塞层^[18-20]。

波导层的引入可以改善 DUV LDs 的光学和电学

特性,波导层的折射率小于量子阱层的折射率,可以更有效地将载流子约束在有源层内,并让光场扩展到这两层中,增加了器件的使用寿命,获得更高的光增益。因此,针对半导体激光器的波导层结构的研究具有重要的意义。目前,针对波导层的研究很少,已提出的优化方案有锥形上波导层、双阶梯波导层,以及单阶梯波导层^[21-23]。以降低载流子泄露、改善有源区的辐射复合速率和缓解极化电场带来的影响为目的,本文提出了双凹型波导层。仿真实验结果证明,双凹型下波导层的引入可以有效提高 LDs 的性能。

2 仿真模型与参数

图 1(a)所示为 DUV LDs 的结构示意图。以 $0.1 \mu\text{m}$ 的 $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ 为衬底,激光二极管的 n 型区由 $0.1 \mu\text{m}$ 的 n 型 $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ 接触层、 $1 \mu\text{m}$ 的 n 型 $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ 包覆层和 $0.06 \mu\text{m}$ 的 n 型 $\text{Al}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{N}$ 下波导层(LWG)组成;多量子阱(MQW)区由两个 3 nm 厚的 $\text{Al}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{N}$ 阱和三个 8 nm 厚的 $\text{Al}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{N}$ 势垒组成;p 型区由 $0.06 \mu\text{m}$ 的 p 型上波导层(UWG)、 $0.01 \mu\text{m}$ 的 p 型 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{N}$ 电子阻挡层(EBL)、 $0.4 \mu\text{m}$ 的 $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ 包覆层和 $0.1 \mu\text{m}$ 的 p 型 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$ 接触层组成。使用对称宽波导结构(波导层厚度为 60 nm)来降低半导体激光器的内损,提高器件的电光转换效率,这已被 Kanskari 等^[24-26]证实过。太厚的波导层会极大增加激光器的串联电阻和阈值电流,而太薄的波导层会削弱器件的光约束。上述所有 n 型掺杂均为 Si 掺杂,p 型掺杂均为 Mg 掺杂。该仿真在室温下进行,激光器的腔长为 $530 \mu\text{m}$,激光器的宽度设置为 $4 \mu\text{m}$,内部损耗设为 2400 m^{-1} ,镜面折射率设为 30% ,由自发极化和压电极化引起的内置界面电荷设为 40% ^[27]。

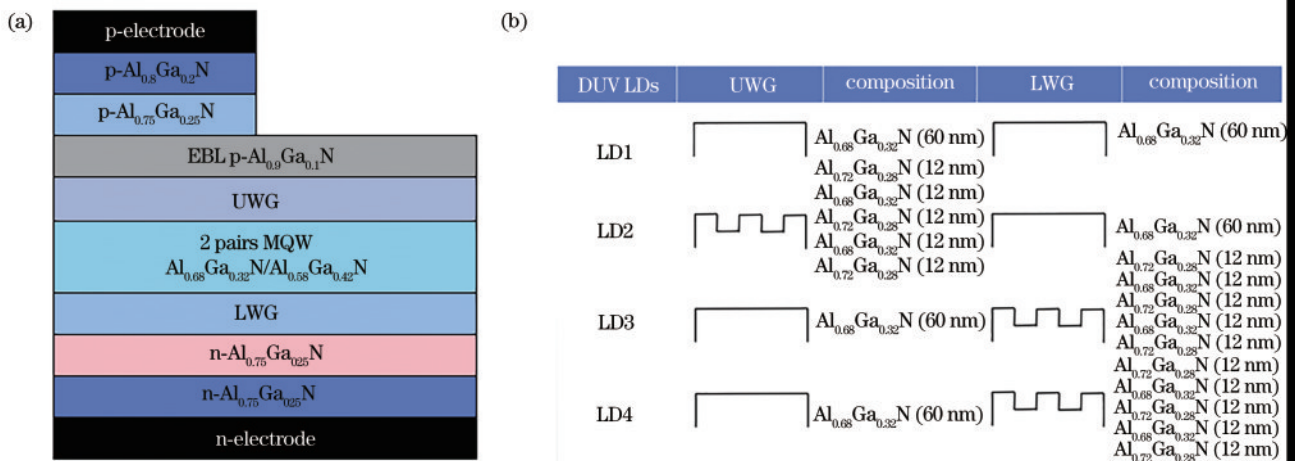


图 1 结构示意图。(a) DUV-LDs 结构示意图;(b) 四种不同波导层结构示意图

Fig. 1 Structure diagrams. (a) Structure diagram of DUV-LDs; (b) structure diagram of four different waveguide layers

用 Lastip 软件在室温下主要对四种不同的波导层结构定量模拟,得到器件的具体物理指标数据。四种结构除波导层的变化外,其余所有参数均保持不变。

LD1 是参照组,具有矩形的上下波导层,具有固定的 Al 组成(0.68);LD2 具有双凹型 UWG 和矩形 LWG;LD3 具有双凹型 LWG 和矩形 UWG;LD4 的波导层结构与

LD3 一致,但 LWG 的 Al 组分不同。四种波导层的原理图如图 1(b)所示。这四种结构的发光波长和材料增益都是相同的,如图 2 所示为模拟的 DUV LDs 的兰兹伯格模型增益^[28],它是加权增益,在 MQW 区域较高,用于发射光谱实现。所有器件具有相同的 MQW 大小和组成,增益在 0.267 μm (267 nm)时达到最大值,器件

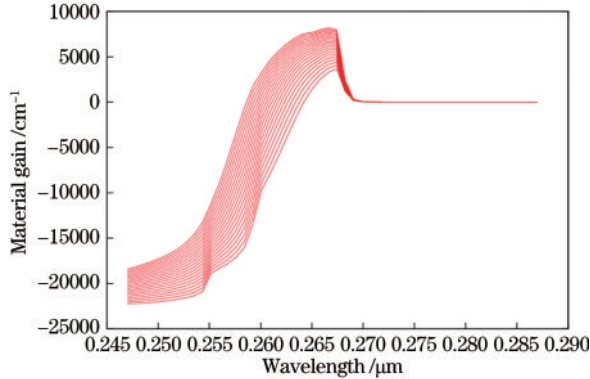


图 2 模拟的 DUV LDs 的兰兹伯格模型增益
Fig. 2 Simulated Landsberg model gain of DUV LDs

MQW 区获得了相同的模型增益。

3 仿真结果及分析讨论

图 3 为 LD1、LD2、LD3 和 LD4 四种不同结构的能带图。有源区极化场的存在会弯曲导带和价带,导致电子和空穴的有效势垒高度降低,从而降低有源区对载流子的约束力。从图 3 可以看出,在最后一个势垒与 UWG 交界处 LD1、LD2、LD3、LD4 的电子有效势垒高度分别为 124、308、122、123 meV,即 LD2 有更高的电子势垒高度能更好地阻止电子从 MQW 区流入 p 区;空穴的有效势垒高度分别为 35、38、34、35 meV,LD3 的空穴势垒高度最低,说明 LD3 能使更多的空穴从 p 区流入 MQW 区,改善了空穴注入效率。在第一个势垒与 LWG 交界处,LD1、LD2、LD3、LD4 的空穴有效势垒高度分别为 187、181、236、219 meV,这表明 LD3 有更高的空穴势垒高度能更有效地阻止空穴从 MQW 区流入 n 区。以上结果说明,优化后的器件改善了有源区极化电场的影响,而由于 Al 组分不同,LD4 的优化效果不如 LD3 明显。

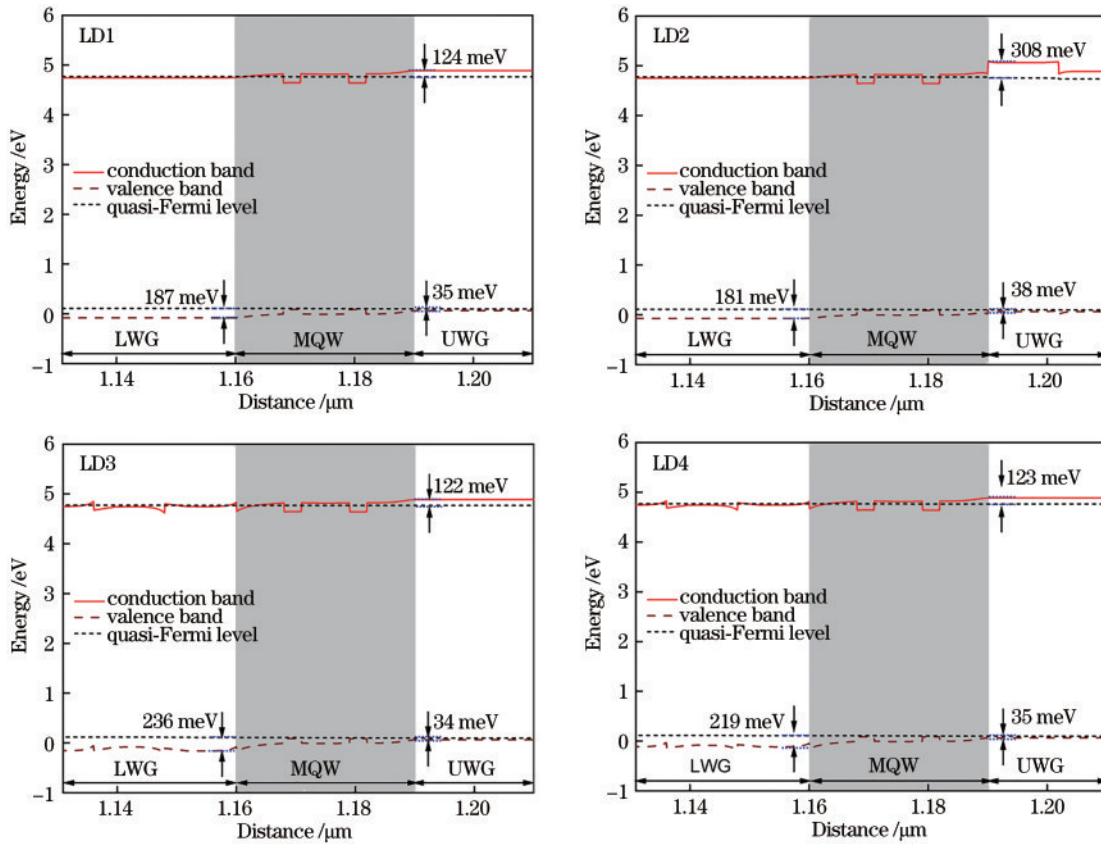


图 3 四种结构的能带图
Fig. 3 Energy band diagrams of four structures

MQW 区的电子浓度分布和空穴浓度分布如图 4(a)和 4(b)所示。可以看出,由于内置电场的存在,电子和空穴的浓度带具有明显的弯曲现象。空穴从 p 区注入到 MQW 区,并与量子井中的电子复合,导致空穴浓度沿 p 区到 n 区方向逐渐减小,部分空穴溢出

至 n 区,而没有与量子阱(QW)中的电子复合,这被定义为空穴泄露。相比于传统的矩形波导层结构,LD2、LD3 和 LD4 结构均显著提高了 MQW 区内电子和空穴的浓度,这也与之前对能带的分析相符合。由于它们的电子和空穴浓度明显提升,因此在 MQW 区中有

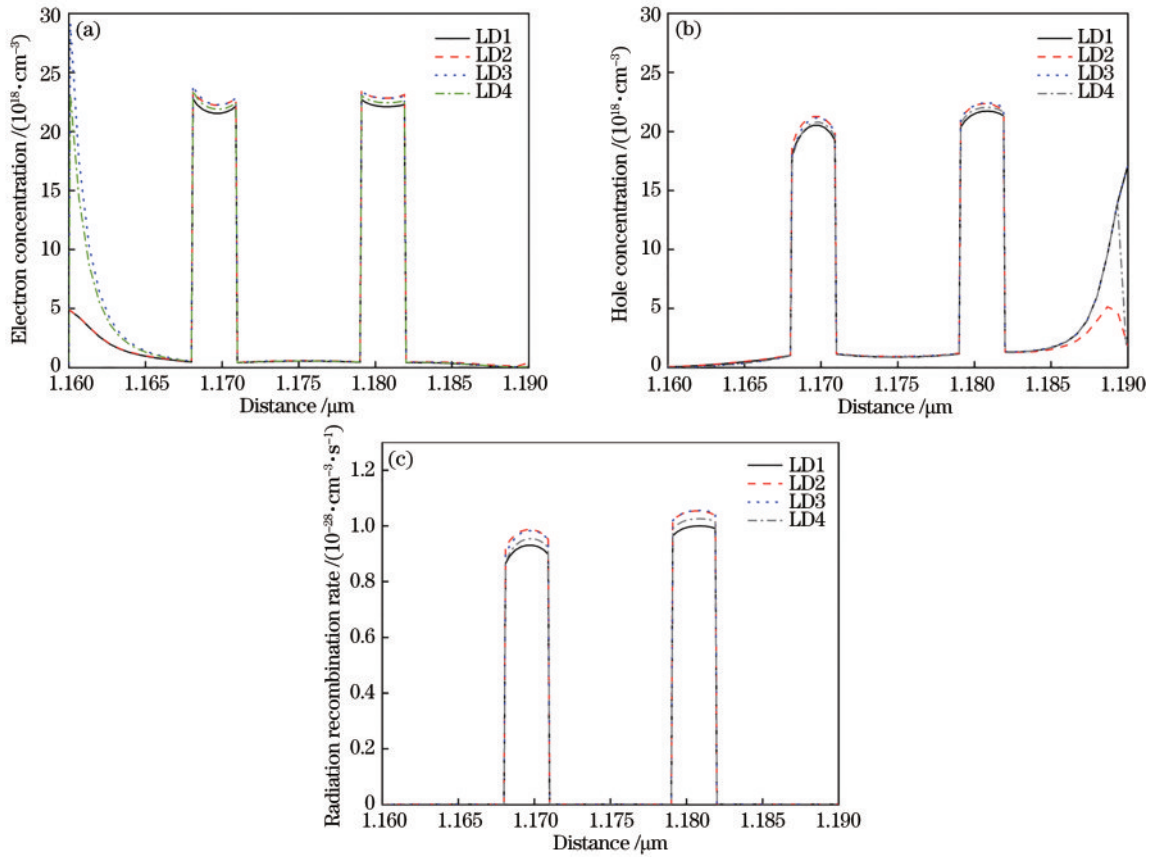


图 4 MQW 区。(a)电子浓度分布;(b)空穴浓度分布;(c)辐射复合速率分布
Fig. 4 MQW region. (a) Electron concentration distribution; (b) hole concentration distribution; (c) radiation recombination rate distribution

着更大的复合概率。如图 4(c)所示,LD2和LD3具有最高的辐射复合速率。LD2结构在两个 QW 中的辐射复合速率分别为 $0.986 \times 10^{-28} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ 和 $1.053 \times 10^{-28} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$,与 LD1 相比,分别提高了约 6.0% 和 5.3%;LD2 结构在两个 QW 中的辐射复合速率分别为 $0.983 \times 10^{-28} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ 和 $1.055 \times 10^{-28} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$,与 LD1 相比,分别提高了约 5.69% 和 5.50%。

由图 4 比较可知,LD2 和 LD3 具有较好的辐射复合特性。进一步探讨 LDs 的电学与光学特性,并在讨

论中加入上下波导层都采用双凹型结构的 LD5,LD5 的 UWG 与 LD2 一致,LWG 与 LD3 一致。由图 5(a) 观察可知,具有双凹型 LWG 的 LD2 斜率效率(SE)为 1.79 W/A,具有双凹型 LWG 的 LD3 的 SE 为 1.81 W/A,具有双凹型上下波导层的 LD5 的 SE 为 1.78 W/A。LD2、LD3、LD5 的阈值电流 I_{th} 分别为 30.04、29.36、32.58 mA。这说明 LD3 结构具有更低的阈值电流和更高的斜率效率,当注入电流相同时,LD3 的输出功率最高,这是因为 LD3 在抑制空穴泄露

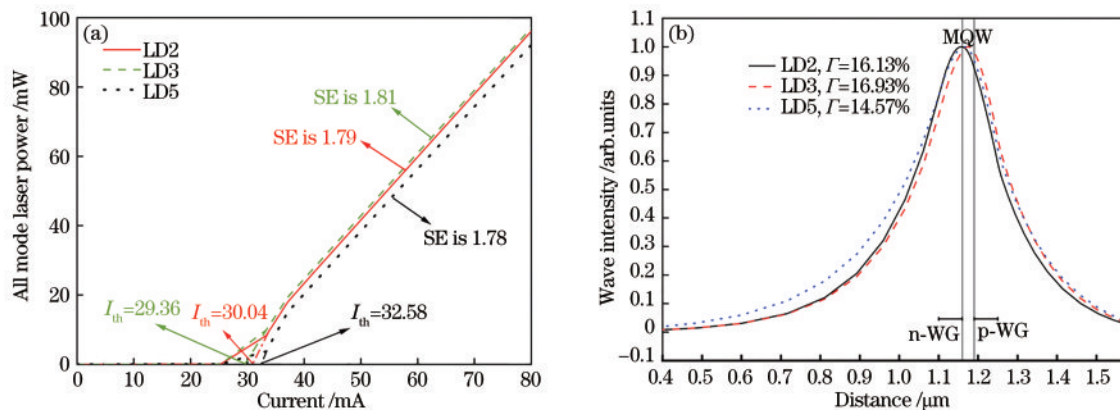


图 5 仿真结果。(a) LD2 和 LD3 的 I-P 曲线;(b) LD2 和 LD3 的光场分布
Fig. 5 Simulation results.(a) I-P curves for LD2 and LD3; (b) optical field distributions for LD2 and LD3

的同时,改善了空穴注入效率,而双凹型 UWG 的引入虽然有效抑制了电子泄露,但使迁移率较小的空穴注入 MQW 区的难度增大,这可从图 3 的能带分析中看出。为了说明优化后的结构对 DUV LDs 光学性质的影响,通过数值模拟计算了近场光学模型剖面,本文计算了 MQW 区的物理量 Γ (光学约束因子):

$$\Gamma = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \varphi^2(x, y) dx / \int_{-\infty}^{\infty} \varphi^2(x, y) dx, \quad (1)$$

式中: d 是有源区的宽度; $\varphi(x, y)$ 是光强^[29]。从图 5(b) 可以看出, LD3 的 Γ 值较高为 16.93%, 这是由于 LD3

的光强峰值更靠近 MQW 中心。结果表明双凹型 LWG 可以更好地实现有源区域的光场约束,有效抑制 LDs 结构的光场泄露,提高 LDs 的发光性能,最有利于二极管的改善。

同时为了与其他不同设计的 LWG 比较阻碍空穴泄露的能力,如图 6(a) 所示,还设计了阶梯渐变 LWG、凸型 LWG、双阶梯渐变 LWG 和阶梯 LWG, 将他们与矩形 LWG 和双凹型 LWG 一起比较 n 型包覆层 (n-CL) 区域的空穴浓度。从图 6(b) 可以看出, 双凹型 LWG 激光器 LD3 在 n 型区域的空穴浓度最低,说明该结构的激光器在七种结构中的空穴泄露最小。

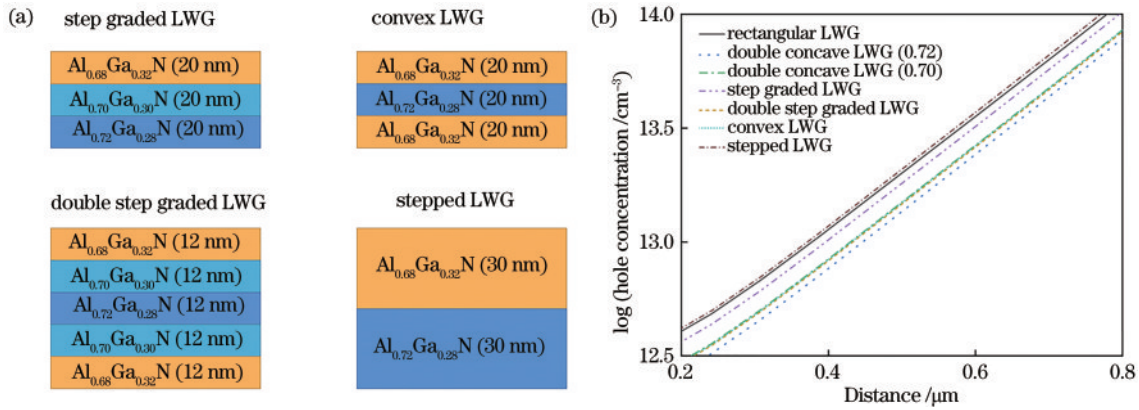


图 6 不同 LWG 结构。(a) 四种不同 LWG 结构示意图;(b) 七种 LWG 结构在 p-CL 区域的空穴浓度

Fig. 6 Different LWG structures. (a) Schematic diagrams of four different LWG structures; (b) hole concentrations of seven LWG structures in p-CL region

4 结 论

本文研究了双凹型 Al_xGa_{1-x}N 波导层对 LDs 所产生的影响,利用 Crosslight 软件对不同的波导层结构进行了模拟仿真研究。研究结果表明,LD2 结构的双凹型 UWG 将电子的有效势垒高度提高至 308 meV,有效抑制了电子泄露;LD3 结构的双凹型 LWG 将空穴的有效势垒高度提高至 236 meV,有效抑制了空穴泄露。优化后的结构具有更高的辐射复合速率,这归因于优化后的器件改善了极化电场对能带的恶化,使 MQW 区中载流子浓度上升,载流子浓度的升高确保了高辐射复合速率。并且 LD3 结构具有更低的阈值电流 29.36 mA 和更高的斜率功率 1.81 W/A;在光场约束方面, Γ 值为 16.93%,具有最优的发光性能。综上,双凹型 LWG 结构将有助于 LDs 光电性能的改善。

参 考 文 献

- [1] Kneissl M, Seong T Y, Han J, et al. The emergence and prospects of deep-ultraviolet light-emitting diode technologies[J]. Nature Photonics, 2019, 13(4): 233-244.
- [2] 李晋闯, 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.

- [3] 盛彬彬, 王玲, 许金通, 等. 利用 AlGaIn 薄膜透射谱提取材料参数的研究[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0313001.
Sheng B B, Wang L, Xu J T, et al. Extraction of material parameters by transmission spectra of AlGaIn film[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0313001.
- [4] 王金艳, 李世杰, 刘天红, 等. 全固态 289.9 nm 紫外激光器的研究[J]. 中国激光, 2022, 49(7): 0701001.
Wang J Y, Li S J, Liu T H, et al. Research on all solid-state ultraviolet laser at 289.9 nm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(7): 0701001.
- [5] Fang M Q, Tian K K, Chu C S, et al. Manipulation of Si doping concentration for modification of the electric field and carrier injection for AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes[J]. Crystals, 2018, 8(6): 258.
- [6] Sato K, Yasue S, Ogino Y, et al. Analysis of spontaneous sub-peak emission from the guide layers of ultraviolet-B laser diode structure containing composition-graded p-AlGaIn cladding layer[J]. Physica Status Solidi, 2020, 217(14): 1900864.
- [7] Mi Z T, Zhao S R, Liu X H. AlGaIn nanowire deep ultraviolet light emitting diodes and lasers[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2017.

- [8] Li L P, Zhang Y H, Xu S, et al. On the hole injection for III-nitride based deep ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Materials*, 2017, 10(10): 1221.
- [9] Chen Q, Zhang H X, Dai J N, et al. Enhanced the optical power of AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diode by optimizing mesa sidewall angle[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 6100807.
- [10] Nam K B, Li J, Nakarmi M L, et al. Unique optical properties of AlGaIn alloys and related ultraviolet emitters [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(25): 5264-5266.
- [11] Lu H M, Yu T J, Yuan G C, et al. Valence subband coupling effect on polarization of spontaneous emissions from Al-rich AlGaIn/AlN quantum wells[J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27384-27392.
- [12] Sulmoni L, Mehnke F, Mogilatenko A, et al. Electrical properties and microstructure formation of V/Al-based n-contacts on high Al mole fraction n-AlGaIn layers[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(8): 1381-1387.
- [13] Kwon M R, Park T H, Lee T H, et al. Improving the performance of AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes using electron blocking layer with a heart-shaped graded Al composition[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2018, 116: 215-220.
- [14] Wang L Y, He W, Zheng T, et al. Enhanced optical performance of AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diode with m-shaped hole blocking layer and w-shaped electron blocking layer[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2019, 133: 106188.
- [15] Omori T, Ishizuka S, Tanaka S, et al. Internal loss of AlGaIn-based ultraviolet-B band laser diodes with p-type AlGaIn cladding layer using polarization doping[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(7): 071008.
- [16] Zhang Y, Kao T T, Liu J P, et al. Effects of a step-graded $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ electron blocking layer in InGaIn-based laser diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(8): 083115.
- [17] Long H L, Wu F, Zhang J, et al. Anisotropic optical polarization dependence on internal strain in AlGaIn epilayer grown on $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ templates[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(41): 415103.
- [18] Long H L, Wang S, Dai J N, et al. Internal strain induced significant enhancement of deep ultraviolet light extraction efficiency for AlGaIn multiple quantum wells grown by MOCVD[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 680-686.
- [19] Kuhn C, Martens M, Mehnke F, et al. Influence of waveguide strain and surface morphology on AlGaIn-based deep UV laser characteristics[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(41): 415101.
- [20] Xing Z Q, Zhou Y J, Chen X, et al. Increased radiative recombination of AlGaIn-based deep ultraviolet laser diodes with convex quantum wells[J]. *Optoelectronics Letters*, 2020, 16(2): 87-91.
- [21] 常奕栋, 王贞福, 张晓颖, 等. 808 nm 半导体激光芯片波导优化与效率特性分析[J]. *发光学报*, 2021, 42(7): 1040-1048.
- Chang Y D, Wang Z F, et al. Waveguide optimization and efficiency characteristic analysis of 808 nm laser diodes[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(7): 1040-1048.
- [22] 陈航洋, 刘达艺, 李金钗, 等. 高 Al 组分 III 族氮化物结构材料及其在深紫外 LED 应用的进展[J]. *物理学进展*, 2013, 33(2): 43-56
- Chen H Y, Liu D Y, Li J C, et al. High Al group III nitride structural materials and their application in deep ultraviolet LED[J]. *Progress in Physics*, 2013, 33(2): 43-56.
- [23] Liang F, Zhao D G, Jiang D S, et al. Suppression of optical field leakage in GaIn-based green laser diode using graded-indium $\text{n-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ lower waveguide[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2019, 132: 106153.
- [24] Kanskar M, Earles T, Goodnough T, et al. High-power conversion efficiency Al-free diode lasers for pumping high-power solid-state laser systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5738: 47-56.
- [25] Botez D, Mawst L J, Bhattacharya A, et al. 66% CW wallplug efficiency from Al-free 0.98 μm -emitting diode lasers[J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(21): 2012-2013.
- [26] Golikova E, Gorbylev V, Davidyuk N, et al. Separately bounded InGaAsP high-power laser heterostructures obtained by VPE of organometallic compounds[J]. *Technical Physics Letters*, 2000, 26(3): 225-227.
- [27] Hou Y F, Zhao D G, Liang F, et al. Characteristics of InGaIn-based green laser diodes with additional InGaIn hole reservoir layer[J]. *Vacuum*, 2021, 186: 110049.
- [28] Prasad S, Mondal R K, Chatterjee V, et al. Double-side step-graded AlGaIn electron blocking layer for nearly droop-free GaIn-based blue LEDs[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2019, 132: 106167.
- [29] Xing Z Q, Zhou Y J, Liu Y H, et al. Reduction of electron leakage of AlGaIn-based deep ultraviolet laser diodes using an inverse-trapezoidal electron blocking layer [J]. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(2): 027302.