

激光与光电子学进展

具有单调组分渐变空穴存储层和对称组分渐变空穴阻挡层的深紫外激光二极管性能优化

张傲翔¹, 张鹏飞¹, 贾李亚¹, Muhammad Nawaz Sharif¹, 王芳^{1,2*}, 刘玉怀^{1,2,3**}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郑州唯独电子科技有限公司, 河南 郑州 450001;³郑州大学产业技术研究院有限公司, 河南 郑州 450001

摘要 为了优化深紫外激光二极管(DUV-LD)的电光转换效率与输出功率,提出了单调组分渐变空穴存储层(MCG-HRL)和对称组分渐变空穴阻挡层(SCG-HBL)结构。使用Crosslight软件对采用基础结构、矩形空穴存储层(R-HRL)、MCG-HRL以及MCG-HRL和SCG-HBL的DUV-LD进行了仿真研究。结果表明,采用MCG-HRL和SCG-HBL能够更加有效地提升DUV-LD量子阱(QWs)内的空穴浓度,减少n型区的空穴泄露,增加QWs内的辐射复合率,降低其阈值电压与电阻,提升其电光转换效率与输出功率。

关键词 光学器件; 激光技术; 深紫外激光二极管; AlGaIn; 空穴存储层; 空穴阻挡层

中图分类号 O472

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220595

Optimization of Deep Ultraviolet Laser Diode with Monotonic Compositionally Graded Hole Reservoir Layer and Symmetric Compositionally Graded Hole Blocking Layer

Zhang Aoxiang¹, Zhang Pengfei¹, Jia Liya¹, Muhammad Nawaz Sharif¹,
Wang Fang^{1,2*}, Liu Yuhuai^{1,2,3**}¹National Center for International Joint Research of Electronic Materials and Systems, School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;²Zhengzhou Way Do Electronics Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001, Henan, China;³Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract A monotonic compositionally graded hole reservoir layer (MCG-HRL) and a symmetric compositionally graded hole blocking layer (SCG-HBL) structures are proposed to optimize the electro-optical conversion efficiency and output power of the deep ultraviolet laser diode (DUV-LD). Crosslight software is used to simulate the DUV-LD with infrastructure, rectangular HRL (R-HRL), MCG-HRL, and MCG-HRL structures. The simulation results indicate that the MCG-HRL and SCG-HBL effectively contribute to the increased hole concentration in the quantum wells (QWs), reduce hole leakage in the n-type region, increase radiation recombination rate in the QWs, reduce threshold voltage and resistance, and increase electro-optical conversion efficiency and output power of the DUV-LD.

Key words optical device; laser techniques; deep ultraviolet laser diode; AlGaIn; hole reservoir layer; hole blocking layer

1 引言

随着半导体激光技术的高速发展,半导体发光器件在深紫外波段的应用不断拓宽,广泛应用于高密度

信息存储、生物医学研究、环境保护、激光医疗等方面^[1-5]。COVID-19病毒的大规模传播引起了人们对消毒产品的关注,作为一种广泛应用的杀菌方法,深紫外发光器件的开发和应用得到更进一步的发展^[6]。

收稿日期: 2022-01-20; 修回日期: 2022-02-25; 录用日期: 2022-03-05; 网络首发日期: 2022-03-15

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; **ifyhliu@zzu.edu.cn

深紫外激光二极管(DUV-LD)具有体积小、重量轻、转换效率高、可靠性高等优点^[7-10]。但由于材料较大的位错密度和高激活能以及极化电场的作用^[11-13],仍然存在载流子限制能力较差、空穴注入效率较低、辐射复合率与功率不高等问题^[14-17]。其中由于高铝组分AlGa_xN的p型掺杂效率低且Mg受主激活能高导致空穴浓度小^[18];多量子阱(QWs)垒结构的设计降低了价带对于空穴的有效势垒高度^[19],即降低了QWs对空穴的限制能力,导致相当一部分的空穴逸出;电子阻挡层也会对空穴注入有阻碍作用^[20];这些原因导致QWs内的空穴注入效率较低,对DUV-LD的辐射复合率、电光转换效率和输出功率等性能造成负面影响。为了解决这个问题,Wu等^[21]提出了AlGa_xN基空穴注入层结构,Xing等^[22]提出了凸型QWs结构。

由于空穴注入效率的提高可以有效地抑制深紫外发光器件的效率衰退^[23],因此本文提出了通过提升空穴注入效率以达到优化DUV-LD的电光转换效率与输出功率目的的两个思路:一是提升空穴注入,增加QWs内的空穴浓度;二是降低空穴泄露,更好地将空穴限制在QWs内。为此设计了单调组分渐变空穴存

储层(MCG-HRL)和对称组分渐变空穴阻挡层(SCG-HBL),对采用基础结构、矩形空穴存储层(R-HRL)、MCG-HRL以及MCG-HRL和SCG-HBL的DUV-LD进行了仿真研究。结果表明,采用MCG-HRL和SCG-HBL能够更有效地提升DUV-LD的空穴注入效率,增加QWs内的辐射复合率,降低其阈值电压与电阻,提升其在光激励状态下的电光转换效率与输出功率。

2 仿真模型与参数

图1(a)所示为以0.1 μm的Al_{0.75}Ga_{0.25}N为衬底的DUV-LD基础结构(本文记为结构A)的示意图。该DUV-LD的n型区由1 μm的n型Al_{0.75}Ga_{0.25}N包覆层、0.11 μm的n型Al_{0.68}Ga_{0.32}N下波导层(LWG)和12 nm的n型Al_{0.88}Ga_{0.12}N空穴阻挡层组成;有源区为多量子阱(MQW)结构,由3个8 nm的Al_{0.68}Ga_{0.32}N量子势垒和2个3 nm的Al_{0.58}Ga_{0.42}NQWs交替组成;p型区由0.07 μm的p型Al_{0.68}Ga_{0.32}N上波导层(UWG)、0.01 μm的p型Al_{0.92}Ga_{0.08}N电子阻挡层(EBL)、0.4 μm的p型Al_{0.75}Ga_{0.25}N包覆层(CL)和0.1 μm的p型Al_{0.80}Ga_{0.20}N接触层组成。

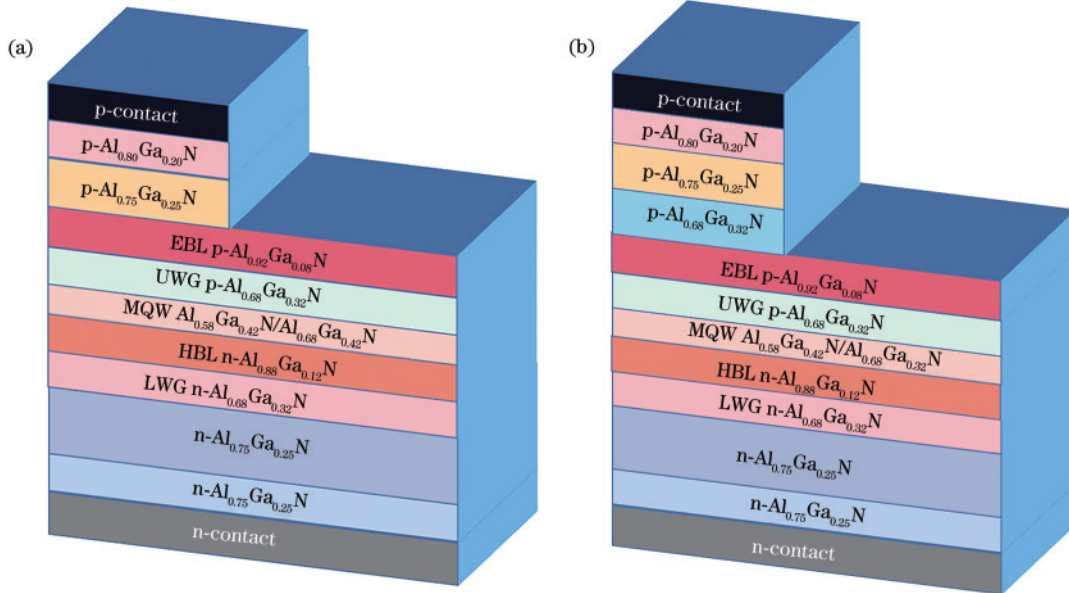


图1 结构示意图。(a) 结构A;(b) 结构B

Fig. 1 Structure diagrams. (a) Structure A; (b) structure B

在结构A的基础上,在EBL和CL之间插入0.24 μm的p型Al_{0.68}Ga_{0.32}N空穴存储层(本文记为结构B)以提升空穴注入,如图1(b)所示。为了优化空穴注入,在结构B的基础上,在保证厚度和平均铝组分的前提下,设计了MCG-HRL结构(本文记为结构C)。MCG-HRL由0.04 μm的Al_{0.65}Ga_{0.35}N、0.04 μm的Al_xGa_{1-x}N(x 从0.65递增到0.67)、0.08 μm的Al_xGa_{1-x}N(x 从0.67递增到0.69)、0.04 μm的Al_xGa_{1-x}N(x 从0.69递增到0.71)和0.04 μm的Al_{0.71}Ga_{0.29}N组成。为了降低空穴泄露,在结构C的基础上,在保证厚度和平均铝

组分不变的前提下,进一步优化HBL的结构,设计了SCG-HBL(本文记为结构D)。SCG-HBL由2 nm的Al_xGa_{1-x}N(x 从0.83递增到0.87)、3 nm的Al_xGa_{1-x}N(x 从0.87递增到0.91)、2 nm的Al_{0.91}Ga_{0.09}N、3 nm的Al_xGa_{1-x}N(x 从0.91递减到0.87)和2 nm的Al_xGa_{1-x}N(x 从0.87递减到0.83)组成。图2(a)为MCG-HRL的结构示意图,图2(b)为SCG-HBL的结构示意图。图3(a)所示为MCG-HRL的铝组分变化图,图3(b)所示为SCG-HBL的铝组分变化图。

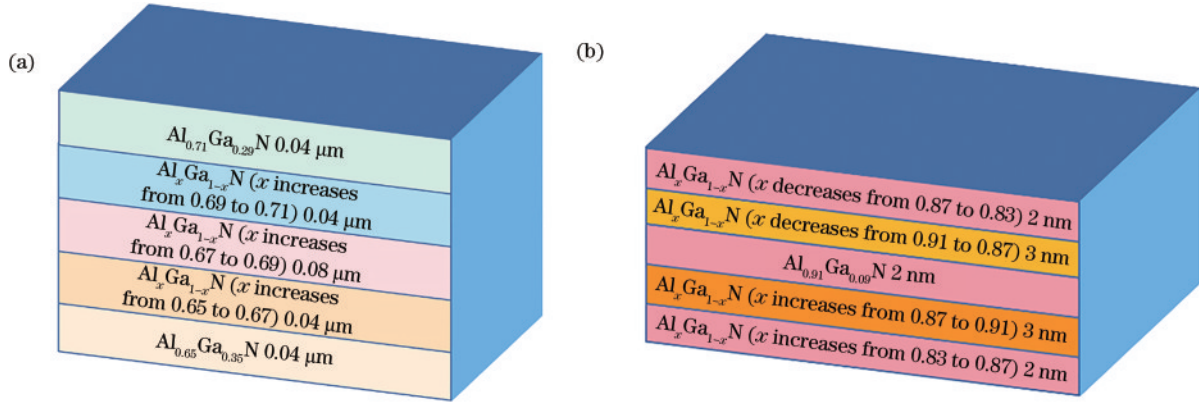


图2 结构示意图。(a) MCG-HRL; (b) SCG-HBL

Fig. 2 Structure diagrams. (a) MCG-HRL; (b) SCG-HBL

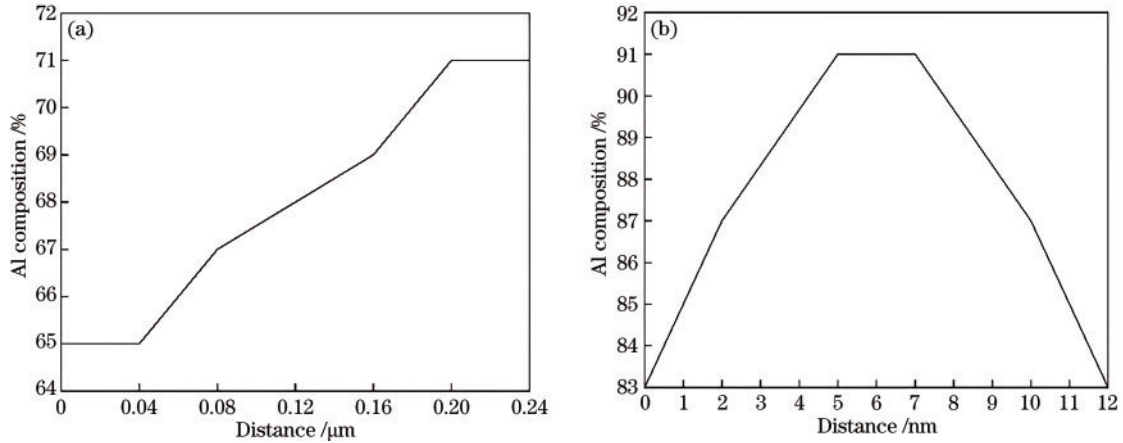


图3 铝组分变化示意图。(a) MCG-HRL; (b) SCG-HBL

Fig. 3 Schematic diagrams of aluminum composition change. (a) MCG-HRL; (b) SCG-HBL

在该仿真中,使用 Crosslight 软件对采用基础结构、R-HRL、MCG-HRL 以及 MCG-HRL 和 SCG-HBL 的 DUV-LD 进行对比研究。激光器的腔长设为 530 μm ,激光器宽度设为 4 μm ,回损设为 2400,镜面折射率设为 30%^[24]。由自发极化和压电极化引起的内置界面电荷按照理论值的 40% 计算^[25]。环境温度设为 300 K。

3 仿真结果及分析讨论

能带结构通过影响载流子的迁移与分布对器件的性能产生影响^[26],因此对器件能带结构的研究非常重要。由于极化电场的作用,不同结构的 HRL 与 HBL 具有不同的有效势垒高度^[27],有效势垒高度定义为能带边缘与其相对应的准费米能级之间的电位差^[28],其高度对载流子的注入与限制有一定的影响。图 4(a)~4(d)所示分别为结构 A、结构 B、结构 C 和结构 D 的能带和准费米能级图。从图中数据可得结构 A、结构 B、结构 C、结构 D 在导带上对电子有效势垒高度分别为 523、507、163、136 meV,在价带上对空穴的有效势垒高度分别为 256、242、315、526 meV。通过对比可以看出,相比于结构 A、结构 B、结构 C,结构 D 对电子的有

效势垒高度分别降低了 387、371、27 meV,对空穴的有效势垒高度分别升高了 270、284、211 meV。仿真结果说明,通过采用 MCG-HRL 和 SCG-HBL 使 DUV-LD 的能带结构得到了优化。图 5 所示为四种结构 DUV-LD 在 QWs 内的空穴浓度和 n 型区的空穴泄露对比图。从图中数据可得,相比结构 A 和结构 B 在 QWs 内的空穴浓度,结构 C 的空穴浓度得到提升,这说明 MCG-HRL 提升了 DUV-LD 的空穴注入。相比于结构 C,结构 D 在 QWs 内空穴浓度的提升和在 n 型区空穴泄露的减小进一步说明 SCG-HBL 可以更好地将空穴限制在 QWs 内以提升其空穴注入效率。在 QWs 附近空穴阻挡层的位置出现空穴峰值浓度较高是由于 SCG-HBL 较好的空穴阻挡效果,空穴在此区域的平均浓度不高,且该区域厚度较薄,因此对浓度和迁移率较高、有效质量较低的电子损耗有限,而空穴注入效率的提升将对器件性能带来更大的增益。取四种结构在同一位置上的空穴浓度值进行量化分析以对比空穴泄露情况。通过图中数据可得,相比于结构 A、结构 B、结构 C,结构 D 在 n 型区的空穴泄露分别降低了 34.5%、35.2%、29.5%。结合以上对比结果与四种结构的能带图,说明同时采用 MCG-HRL 和 SCG-HBL

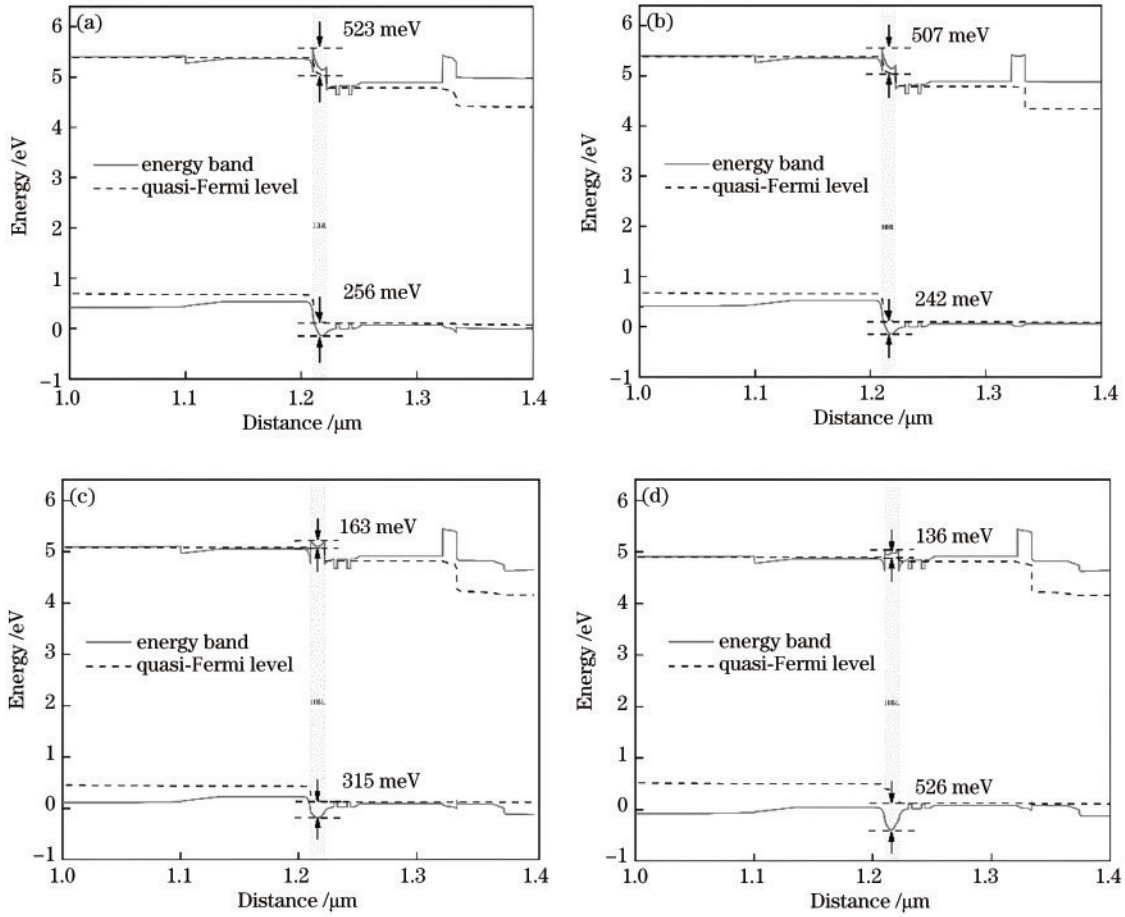


图 4 能带图与准费米能级图。(a)结构 A;(b)结构 B;(c)结构 C;(d)结构 D

Fig. 4 Energy band diagrams and quasi-Fermi energy level diagrams. (a) Structure A; (b) structure B; (c) structure C; (d) structure D

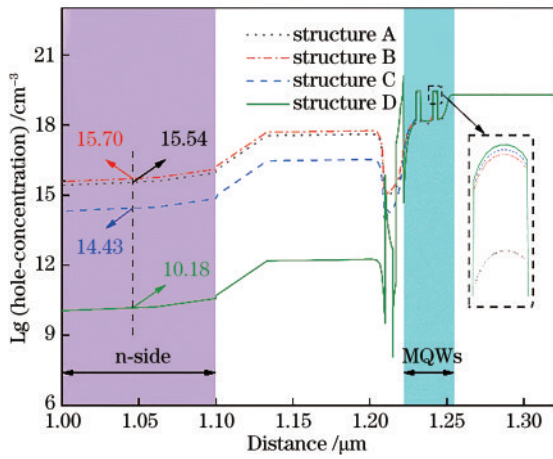


图 5 四种结构在 QWs 内的空穴浓度和 n 型区的空穴泄露

Fig. 5 Hole concentration in QWs and hole leakage in n-type regions of four structures

能够在提升空穴注入的同时,更有效地将空穴限制在 QWs 内,减少空穴泄露,从而提升空穴注入效率以优化器件性能^[29]。

电子与空穴在 QWs 内复合后能量以光子的形式放出的复合方式称为辐射复合。辐射复合是 DUV-LD 的发光机制,辐射复合率的大小影响器件的光学与

电学性能,其与载流子的浓度有关,载流子的浓度越高,发生辐射复合的概率越大。但相比较高的电子注入,p 型区空穴浓度小,QWs 内空穴注入效率低,因此空穴浓度对辐射复合率影响较大。图 6 所示为四种结构的 DUV-LD 在 QWs 内的辐射复合率对比图。从图中数据可得,相比于结构 A、结构 B、结构 C,结构 D 在 QWs 内的辐射复合率分别提升了 28.5%、2.7%、

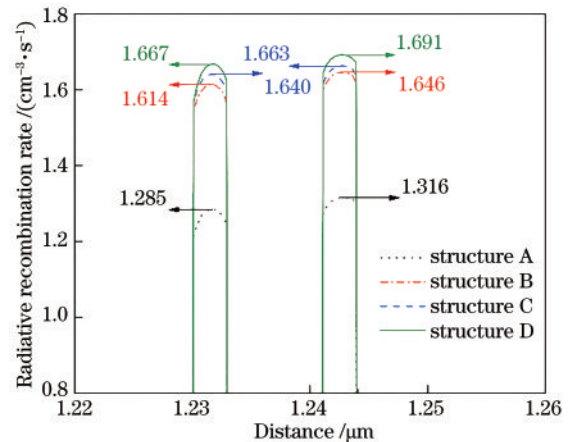


图 6 四种结构在 QWs 内的辐射复合率

Fig. 6 Radiation recombination rates in QWs of four structures

1.7%。这是由于 MCG-HRL 和 SCG-HBL 的采用提升了 QWs 内的空穴注入效率, QWs 内有更多的空穴可以与电子发生辐射复合, 从而增加了器件的辐射复合率。

图 7 所示为四种结构 DUV-LD 的 I-V 曲线。依照仿真数据并结合图像, 可得结构 A、结构 B、结构 C、结构 D 的阈值电压分别为 4.97、5.03、4.88、4.71 V, 电阻分别为 5.52、4.84、3.07、2.57 Ω 。相比结构 A、结构 B、结构 C, 结构 D 具有更低的阈值电压与电阻。结果表明 MCG-HRL 和 SCG-HBL 可以更有效地降低 DUV-LD 的阈值电压与电阻。在相同的输入条件下, 阈值电压越低, 器件将获得更高的注入电流; 等效电阻越小, 则会产生更少的热损耗。阈值电压与电阻的降低对 DUV-LD 电光转换效率的提升具有一定的积极意义。

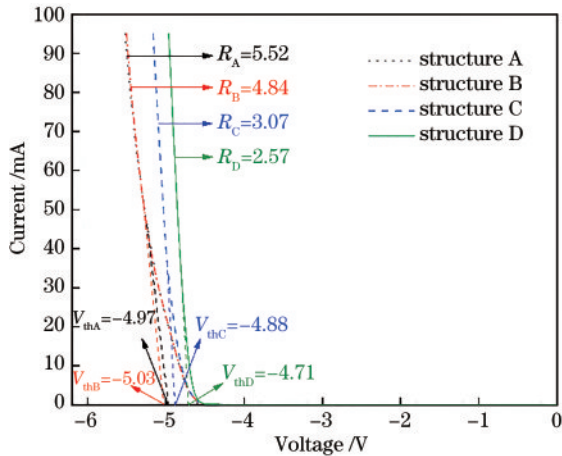


图 7 四种结构的 I-V 曲线
Fig. 7 I-V curves of four structures

电光转换效率是指输出光功率与输入电功率之间的比值^[30]。图 8 所示为四种结构 DUV-LD 的电光转换效率对比图。取相同电流下四种结构的电光转换效率值进行量化分析, 可得相比于结构 A、结构 B、结构 C, 结构 D 的电光转换效率分别提升了 15.1%、35.5%、

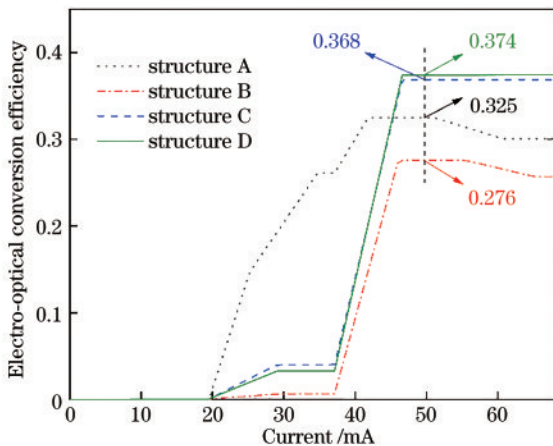


图 8 四种结构的电光转换效率
Fig. 8 Electro-optical conversion efficiency of four structures

1.6%。在相同的输入条件下, 由于空穴注入效率与辐射复合率提升, 结构 D 中有更多的电子和空穴在 QWs 内发生辐射复合释放光子; 且由于阈值电压与等效电阻的降低, 结构 D 将产生更少的废热, 减少了损耗, 从而提升了 DUV-LD 的电光转换效率。较高的电光转换效率可以降低器件散热成本, 便于实现器件的小型化与便携化, 同时降低能耗, 延长其使用寿命^[31]。

斜率效率显示了 DUV-LD 输出功率随电流增加而增加的能力^[32]。依据图 9 中的数据, 计算了四种结构的斜率效率, 结构 A、结构 B、结构 C、结构 D 的斜率效率分别为 1.25、1.05、1.71、1.73。相比于结构 A、结构 B、结构 C, 结构 D 的斜率效率有较为明显的提升。阈值电流是器件由自发辐射转换到受激辐射状态时的正向电流值, 受激辐射的条件之一是粒子数反转, 而要达到粒子数反转, 注入载流子的浓度必须大于平衡载流子的浓度^[33]。空穴存储层的插入在提升有源区空穴注入的同时会导致平衡载流子浓度的提升, 因此激光二极管需要更高的载流子注入以达到有源区的粒子数反转, 阈值电流随之增加。激光二极管一般工作在高注入电流下的光激射状态^[34], 斜率效率和阈值电流的提升意味着相比结构 A, 结构 D 在高注入电流下光激射状态时的输出功率会有更大优势。

输出功率是 DUV-LD 的一个重要性能指标, 在相同工作条件下, 其会随电光转换效率的升高而升高^[35]。图 9 为四种结构的 P-I 曲线。由图 9 中数据可知, 结构 A、结构 B、结构 C、结构 D 的输出功率分别为 91.65、65.37、102.20、103.43 mW。相比于结构 A、结构 B、结构 C, 结构 D 的输出功率分别提升了 12.9%、58.2%、1.2%。由此可知, MCG-HRL 和 SCG-HBL 能够更有效地提升 DUV-LD 在光激射状态下的输出功率。

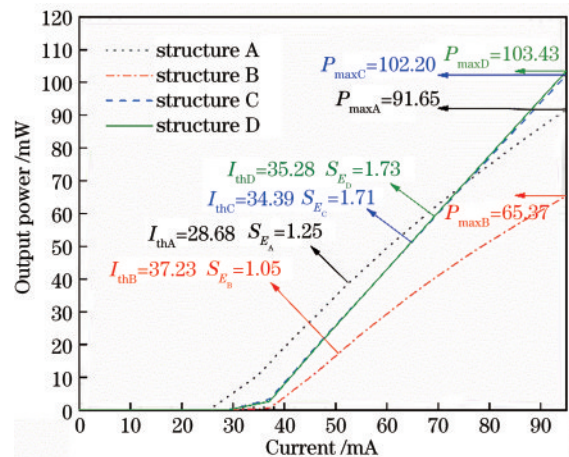


图 9 四种结构的 P-I 曲线
Fig. 9 P-I curves of four structures

4 结 论

为了优化 DUV-LD 的电光转换效率和输出功率,

提出了 MCG-HRL 和 SCG-HBL 结构。对采用基础结构、R-HRL、MCG-HRL, 以及 MCG-HRL 和 SCG-HBL 的 DUV-LDs 进行了仿真研究与对比分析, 结果表明, 采用 MCG-HRL 和 SCG-HBL 提升了 QWs 内的空穴注入效率, 增加了辐射复合率; 其阈值电压降低为 4.71 V, 电阻降低为 2.57 Ω ; 由于辐射复合率的提升与损耗的降低, 电光转换效率提升为 37.4%; 同时随着斜率效率提升至 1.73, 高注入电流下的输出功率提升为 103.43 mW。综上所述, 采用 MCG-HRL 和 SCG-HBL 可以更有效地提升空穴注入效率, 增加辐射复合率, 降低阈值电压与电阻, 从而提升电光转换效率, 减少废热的产生, 节约能耗, 增加工作寿命; 提升斜率效率, 从而提升其光激励状态下的输出功率, 对通过提升 DUV-LD 空穴注入效率以优化其光学与电学性能的研究具有一定的参考意义。

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] Krames M R, Shchekin O B, Mueller-Mach R, et al. Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting[J]. *Journal of Display Technology*, 2007, 3(2): 160-175.
- [3] Yeh N G, Wu C H, Cheng T C. Light-emitting diodes: their potential in biomedical applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(8): 2161-2166.
- [4] 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.
- [5] Song K, Mohseni M, Taghipour F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: a review[J]. *Water Research*, 2016, 94: 341-349.
- [6] Hadi J, Dunowska M, Wu S Y, et al. Control measures for SARS-CoV-2: a review on light-based inactivation of single-stranded RNA viruses[J]. *Pathogens*, 2020, 9(9): 737.
- [7] 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.
- [8] Sato K, Yasue S, Ogino Y, et al. Analysis of spontaneous subpeak emission from the guide layers of the ultraviolet-B laser diode structure containing composition-graded p-AlGaIn cladding layers[J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2020, 217(14): 1900864.
- [9] Shimokawa M, Teramura S, Tanaka S, et al. Reduction of dislocation density in Al_{0.5}Ga_{0.4}N film grown on sapphire substrates using annealed sputtered AlN templates and its effect on UV-B laser diodes[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2021, 575: 126325.
- [10] 侯杰, 贾海旭, 白雅苏拉. 915 nm 激光二极管端面泵浦的高稳定性全固态 355 nm 紫外激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1914003.
Hou J, Jia H X, Baiya S L. 355 nm all-solid state ultraviolet laser with high stability end-pumped by 915 nm laser diode[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1914003.
- [11] 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.
- [12] Zhao S, Sadaf S M, Vanka S, et al. Sub-milliwatt AlGaIn nanowire tunnel junction deep ultraviolet light emitting diodes on silicon operating at 242 nm[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(20): 201106.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Yang W, Li D, He J, et al. Advantage of tapered and graded AlGaIn electron blocking layer in InGaIn-based blue laser diodes[J]. *Physica Status Solidi C*, 2013, 10(3): 346-349.
- [16] Yoshida H, Yamashita Y, Kuwabara M, et al. Demonstration of an ultraviolet 336 nm AlGaIn multiple-quantum-well laser diode[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(24): 241106.
- [17] 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.
- [18] 田康凯, 楚春双, 毕文刚, 等. AlGaIn 基深紫外发光二极管空穴注入效率的提高途径[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(6): 060001.
Tian K K, Chu C S, Bi W G, et al. Hole injection efficiency improvement for AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diodes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(6): 060001.
- [19] Shi L, Du P, Tao G Y, et al. High efficiency electron-blocking-layer-free deep ultraviolet LEDs with graded Al-content AlGaIn insertion layer[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2021, 158: 107020.
- [20] Shih Y H, Chang J Y, Sheu J K, et al. Design of hole-blocking and electron-blocking layers in Al_xGa_{1-x}N-based UV light-emitting diodes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, 63(3): 1141-1147.
- [21] Wu L J, Li S T, Liu C, et al. Simulation study of blue InGaIn multiple quantum well light-emitting diodes with different hole injection layers[J]. *Chinese Physics B*,

- 2012, 21(6): 587-591.
- [22] 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.
- [23] Wang W D, Chu C S, Zhang D Y, et al. Impact of auger recombination, electron leakage and hole injection on efficiency droop for DUV LEDs[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(7): 897-903.
- [24] 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.
- [25] Dong K X, Chen D J, Liu B, et al. Characteristics of polarization-doped N-face III-nitride light-emitting diodes [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(7): 073507.
- [26] Kuo Y K, Chen F M, Chang J Y, et al. Design and optimization of electron-blocking layer in deep ultraviolet light-emitting diodes[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2020, 56(1): 3300206.
- [27] 王洪, 于军胜, 李璐, 等. BCP层对蓝光有机电致发光器件效率的影响[J]. 光电子·激光, 2008, 19(11): 1429-1432.
- Wang H, Yu J S, Li L, et al. Effect of BCP layer on organic light-emitting devices performance[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2008, 19(11): 1429-1432.
- [28] Zhang M, Li Y, Chen S C, et al. Performance improvement of AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diodes by using staggered quantum wells[J]. Superlattices and Microstructures, 2014, 75: 63-71.
- [29] Usman M, Malik S, Khan M A, et al. Suppressing the efficiency droop in AlGaIn-based UVB LEDs[J]. Nanotechnology, 2021, 32(21): 215703.
- [30] 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, Zhang X Y, et al. Waveguide optimization and efficiency characteristic analysis of 808 nm laser diodes[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(7): 1040-1048.
- [31] 杜宇琦, 王贞福, 张晓颖, 等. 高功率半导体激光阵列芯片测试表征与仿真优化[J]. 发光学报, 2021, 42(5): 674-681.
- Du Y Q, Wang Z F, Zhang X Y, et al. Testing characterization and simulating optimization of high-power laser diode array chips[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(5): 674-681.
- [32] Yi X Y, Sun H Q, Li Z F, et al. Special AlGaIn graded superlattice hole and electron blocking layers improved performance of AlGaIn-based ultraviolet light-emitting diodes[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 469-473.
- [33] 余金中, 王杏华. 半导体 QWs 激光器[J]. 物理, 2001, 30(11): 717-723.
- Yu J Z, Wang X H. Semiconductor quantum well laser diodes[J]. Physics, 2001, 30(11): 717-723.
- [34] 丛红侠, 冯列峰, 王军, 等. 激光二极管正向电特性的精确检测[J]. 半导体学报, 2006, 27(1): 105-109.
- Cong H X, Feng L F, Wang J, et al. Accurate measurement of forward electrical characteristics in laser diodes[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(1): 105-109.
- [35] 黄佳瑶, 尚林, 马淑芳, 等. 半导体激光器输出功率影响因素的研究进展[J]. 中国材料进展, 2021, 40(3): 218-224.
- Huang J Y, Shang L, Ma S F, et al. Research progress on impact factors to output power of semiconductor laser [J]. Materials China, 2021, 40(3): 218-224.