

激光与光电子学进展

具有阶梯型超晶格电子阻挡层和楔形空穴阻挡层结构的 AlGaIn 基深紫外激光二极管性能优化

张傲翔¹, 任炳阳², 王芳^{1,3,4,5*}, 刘俊杰^{1,3,5}, 刘玉怀^{1,3,4,5**}¹郑州大学电气与信息工程学院电子材料与系统国际联合研究中心, 河南省电子材料与系统国际联合实验室, 河南 郑州 450001;²郑州大学计算机与人工智能学院, 河南 郑州 450001;³郑州大学智能传感器研究院, 河南 郑州 450001;⁴郑州唯独电子科技有限公司, 河南 郑州 450001;⁵郑州大学产业技术研究院有限公司, 河南 郑州 450001

摘要 为了提升深紫外激光二极管(DUV LDs)的载流子注入效率,优化其工作性能,提出了阶梯型超晶格(SSL)电子阻挡层(EBL)和楔形(WS)空穴阻挡层(HBL)结构。使用 Crosslight 软件分别仿真了具有矩形 EBL 和 HBL、矩形超晶格(RSL)EBL 和塔形(TS)HBL 以及 SSL EBL 和 WS HBL 的 DUV LDs。仿真结果表明,SSL EBL 和 WS HBL 更有效地增加了量子阱(QWs)中的载流子注入,减少了非有源区的载流子泄漏,提高了辐射复合率,降低了阈值电压和阈值电流,提高了 DUV LDs 的输出功率和电光转换效率。

关键词 激光器; 深紫外激光二极管; AlGaIn; 阶梯型超晶格; 阻挡层

中图分类号 O472

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221886

Performance Enhancement of Algan-Based Deep Ultraviolet Laser Diodes with Step Superlattice Electron Blocking Layer and Wedge-Shaped Hole Blocking Layer

Zhang Aoxiang¹, Ren Bingyang², Wang Fang^{1,3,4,5*}, Liou Juin. J.^{1,3,5}, Liu Yuhuai^{1,3,4,5**}¹National Center for International Joint Research of Electronic Materials and Systems, International Joint Laboratory of Electronic Materials and Systems of Henan Province, School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;²School of Computer and Artificial Intelligence, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;³Institute of Intelligent Sensing, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;⁴Zhengzhou Way Do Electronics Co., Ltd., Zhengzhou 450001, Henan, China;⁵Research Institute of Industrial Technology Co., Ltd., Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract The step superlattice (SSL) electron blocking layer (EBL) and wedge-shaped (WS) hole blocking layer (HBL) are proposed to improve the carrier injection efficiency, and optimize the performance of the deep ultraviolet laser diodes (DUV LDs). The Crosslight software is used to simulate the DUV LDs with rectangular EBL and HBL, rectangular superlattice (RSL) EBL and tower-shaped (TS) HBL, and SSL EBL and WS HBL, respectively. The simulation results indicate that SSL EBL and WS HBL increase the carrier injection in the quantum wells (QWs), reduce the carrier leakage in the non-active regions, increase radiation recombination rate, reduce the threshold voltage and threshold current, and increase the output power and the electro-optical conversion efficiency of DUV LDs more effectively.

Key words lasers; deep ultraviolet laser diodes; AlGaIn; step superlattice; blocking layers

收稿日期: 2022-05-21; 修回日期: 2022-06-23; 录用日期: 2022-07-26; 网络首发日期: 2022-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(62174148)、国家重点研发计划(SQ2021YFE010807, 2016YFE0118400)、智汇郑州·1125聚才计划(ZZ2018-45)、宁波2025科技创新重大专项(2019B10129)

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

1 引言

随着Ⅲ族氮化物半导体材料和器件的飞速发展, 半导体发光器件在深紫外波段的应用不断拓展^[1], 其广泛应用于污染防治、高密度信息存储和光刻技术^[2-3]。近年来, 由于 COVID-19 病毒的大规模传播, 消毒杀菌产品逐渐在人们日常生活中变得不可或缺, 作为一种常用的消毒手段, 深紫外发光器件的应用得到进一步发展^[4-5]。深紫外激光二极管(DUV LDs)具有体积小、重量轻、可靠性高等优点, 因此得到广泛研究和应用^[6-8]。然而由于晶格失配和极化电场作用, 器件仍然存在严重的载流子泄漏、有源区较弱的载流子限制能力和较低的输出功率等问题^[9-11]。另外, 有限的掺杂效率和 Mg 受主较高的激活能限制了空穴的注入效率, 也抑制了辐射复合率和电光转换效率的提升^[12-13]。

为了解决以上问题: Yang 等^[14]提出了超晶格空穴存储层来提升空穴注入效率; Gupta 等^[15]提出了部分渐变型量子势垒以提升有源区的载流子限制能力; Shi 等^[16]提出了不规则电子阻挡层(EBL)和空穴阻挡层(HBL)以减少载流子泄漏。然而, 电子阻挡层的采用将会阻碍空穴向量子阱(QWs)内注入, 最近的研究表明, 超晶格电子阻挡层能更有效地减少电子泄漏, 同时降低价带对空穴的有效势垒高度, 从而提高空穴注入效率^[17]。合适的空穴阻挡层结构能够为数不多的空穴更有效地限制在量子阱内与电子发生辐射复合^[18], Usman 等^[19]设计了楔形电子阻挡层, 有效地减少了器件的电子泄漏, 空穴的迁移本质也是电子的迁移, 在此引入楔形空穴阻挡层以提升对空穴的限制能力。因此, 本文在传统结构的基础上, 对电子阻挡层和空穴阻挡层进行改进, 设计了矩形超晶格电子阻挡层(RSL EBL)和阶梯型超晶格电子阻挡层(SSL EBL)以在减少电子泄漏的同时增加空穴注入, 并设计了塔形空穴阻挡层(TS HBL)和楔形空穴阻挡层(WS HBL)以更有效地将空穴限制在量子阱内, 提高空穴注入效率。

本文采用 Crosslight 软件对矩形电子阻挡层和矩形空穴阻挡层、RSL EBL 和 TS HBL 以及 SSL EBL 和 WS HBL 的 DUV LDs 进行仿真研究。结果表明, 采用 SSL EBL 和 WS HBL 的 DUV LD 在量子阱内具有更高的载流子浓度, 在非有源区具有更少的载流子泄漏, 同时具有更高的辐射复合率、更低的阈值电压和电阻、更高的电光转换效率和输出功率。以上结果说明, SSL EBL 和 WS HBL 有效地提高了载流子注入效率, 优化了 DUV LDs 的电学和光学性能。

2 仿真模型与参数

图 1 为以 0.1 μm 厚的 $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ 为衬底的 DUV LD 基础结构(文中记为结构 A)示意图^[20]。该 DUV LD 的各层铝组分和掺杂浓度^[21-22]如下: n 型区由 1 μm

厚的 $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ 包覆层(n-doping 为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、0.11 μm 厚的 $\text{Al}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{N}$ 下波导层(n-doping 为 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)和 12 nm 的 $\text{Al}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{N}$ 空穴阻挡层(n-doping 为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)组成; 有源区由 3 个 8 nm 厚的 $\text{Al}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{N}$ 量子势垒和 2 个 3 nm 厚的 $\text{Al}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{N}$ 量子阱交替组成; p 型区由 14 nm 厚的 $\text{Al}_{0.92}\text{Ga}_{0.08}\text{N}$ 电子阻挡层(p-doping 为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、0.07 μm 厚的 $\text{Al}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{N}$ 上波导层(UWG)(p-doping 为 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)、0.4 μm 厚的 $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$ 包覆层(CL)(p-doping 为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)和 0.1 μm 厚的 $\text{Al}_{0.80}\text{Ga}_{0.20}\text{N}$ 接触层(p-doping 为 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)组成。

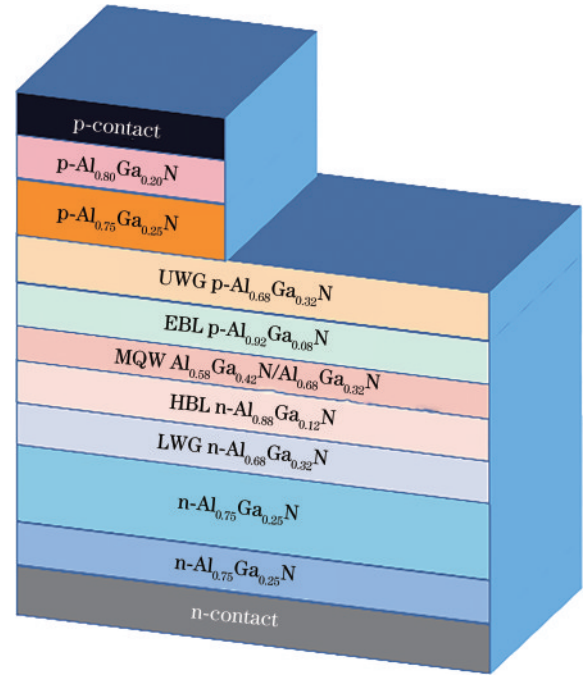


图 1 DUV LDs 的基础结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of basic structure of DUV LDs

在保证厚度、掺杂浓度和平均铝组分不变的前提下, 设计了采用 RSL EBL 和 TS HBL 的 DUV LD(文中记为结构 B), 以及采用 SSL EBL 和 WS HBL 的 DUV LD(文中记为结构 C)。RSL EBL 由 3 层 $\text{Al}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{N}/\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{N}$ 超晶格结构组成。TS HBL 由 $\text{Al}_{0.87}\text{Ga}_{0.13}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{N}$ 、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (x 由 0.88 渐增至 0.9)、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (x 由 0.9 渐减至 0.88)、 $\text{Al}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.87}\text{Ga}_{0.13}\text{N}$ 等 6 层结构组成。SSL EBL 由 $\text{Al}_{0.94}\text{Ga}_{0.06}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.90}\text{Ga}_{0.10}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.86}\text{Ga}_{0.14}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.96}\text{Ga}_{0.04}\text{N}$ 等 7 层结构组成。以上结构每层厚度均为 2 nm。WS HBL 由一层 2 nm 厚的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (x 由 0.84 渐增至 0.88)、一层 4 nm 厚的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (x 由 0.88 渐增至 0.90)、一层 4 nm 厚的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (x 由 0.90 渐减至 0.88) 和一层 2 nm 厚的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (x 由 0.88 渐减至 0.84) 组成。图 2(a)~(d) 分别为 RSL EBL、TS HBL、SSL EBL 和 WS HBL 铝组分变化图。

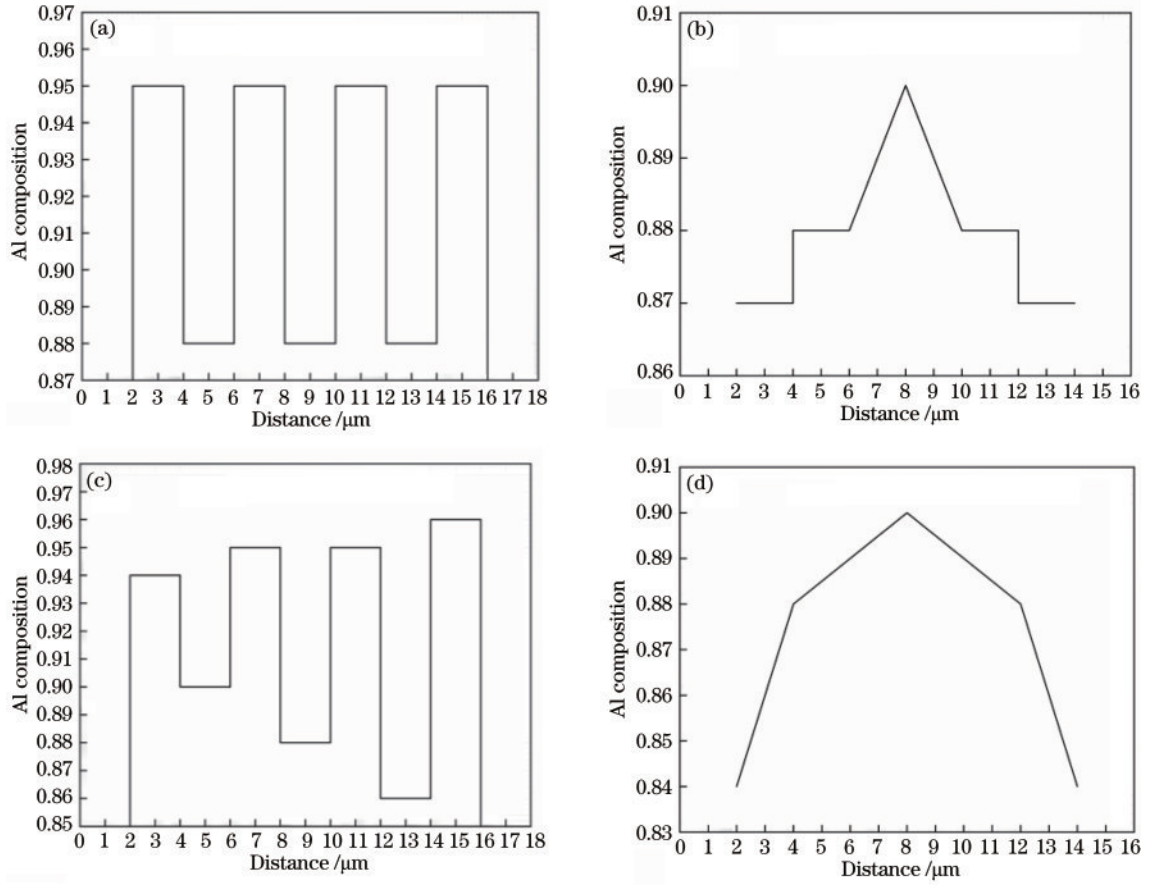


图 2 铝组分变化示意图。(a)矩形超晶格电子阻挡层;(b)塔形空穴阻挡层;(c)阶梯型超晶格电子阻挡层;(d)楔形空穴阻挡层
Fig. 2 Schematic diagram of aluminum component change. (a) RSL EBL; (b) TS HBL; (c) SSL EBL; (d) WS HBL

在该仿真中,激光器的出射波长设为 265 nm,腔长设为 530 μm,激光器的宽度设为 4 μm,镜面反射率设为 30%^[23],背景消光系数设为 2400 m⁻¹,表示由于材料对光的吸收而产生的光损耗^[24-25]。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,环境温度设为 300 K^[26]。

3 仿真结果及分析讨论

器件的能带结构对载流子的迁移与分布有着决定性的影响,因此,对能带图的分析和研究具有很重要的意义^[27]。载流子的注入与限制主要受能带结构中有效势垒高度的影响,有效势垒高度定义为导带(价带)边缘与其对应的电子(空穴)准费米能级之间的电位差^[28]。载流子越过势垒的途径主要是漂移和隧穿,因此,本文讨论势垒高度对以上两种途径的影响。在温度为 T 的非平衡态时,电子占据导带中某一能级 E 的概率 $f_c^{[29]}$ 表示为

$$f_c(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_{Fn}}{k_0 T}\right) + 1}, \quad (1)$$

式中: E_{Fn} 为电子的准费米能级; k_0 为玻尔兹曼常数; T 为温度。设某一势垒处的电子的准费米能级为 E_{Fe} , 有

有效势垒高度为 E_b , 可以越过该势垒的电子所在的能级应高于 $E_b + E_{Fe}$ 。对式(1)进行积分得到:

$$P_c(E) = \int_{E_b + E_{Fe}}^{\infty} \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_{Fe}}{k_0 T}\right) + 1} dE. \quad (2)$$

由式(2)可知,电子可以越过该势垒的概率 P_c 。分析可知:有效势垒高度越高,能越过势垒的电子越少,越利于电子的限制;有效势垒高度越低,能越过势垒的电子越多,越利于电子的注入。空穴迁移的本质也是电子的迁移,因此在价带上对空穴的有效势垒的高度也以同样的方式影响空穴的限制和注入。

除了漂移,少部分载流子会通过隧穿效应越过势垒。载流子的隧穿概率^[30]表示为

$$T = \left[1 + \frac{1}{4} \left(\alpha + \frac{1}{\alpha} \right) \text{sh}^2(\gamma a) \right]^{-1}, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\gamma}{k}, \quad (4)$$

$$\gamma = \sqrt{2m^*(V_0 - E)/\hbar^2}, \quad (5)$$

$$k = \sqrt{2m^*E/\hbar^2}, \quad (6)$$

式中: a 为势垒宽度; k 为势垒两侧波函数的波矢; γ 为势垒区波函数的波矢; E 为载流子的能量; m^* 为载流子的有效质量; V_0 为有效势垒高度; \hbar 为普朗克常量; sh

代表双曲正弦函数由式(3)可知:当势垒的宽度相同时,其有效势垒高度越高,载流子发生隧穿的概率越低,越难以穿过势垒;有效势垒高度越低,载流子发生隧穿的概率越高,穿过势垒的概率越大。结合以上分析,本文研究了三种结构在导带上对电子的有效势垒高度和在价带上对空穴的有效势垒高度,来阐释能带结构对载流子限制和注入的影响。图 3(a)~(c)分别为结构 A、B 和 C 的能带和准费米能级图。首先分析了电子阻挡层在导带和价带上的能带变化,结构 A、B 和 C 在导带上对电子的有效势垒高度分别为 664 meV、689 meV 和 728 meV,三种结构的在价带上对空穴的有效势垒高度分别为 125 meV、115 meV 和 109 meV。与结构 A 和结构 B 相比,结构 C 对电子的有效势垒高度分别增加了 64 meV 和 39 meV,对空穴的有效势垒高度分别降低了 16 meV 和 6 meV,这是由于相关研究表明,超晶格结构将降低电子阻挡层在价带上对空穴的有效势垒高度,

同时电子泄漏被抑制,这意味着空穴在 p 型区和泄漏的电子发生非辐射复合的概率将降低,因此有源区内的空穴注入效率得以进一步加强^[31]。然后分析了空穴阻挡层在导带和价带上的能带变化,三种结构在导带上对电子的有效势垒高度分别为 547 meV、349 meV 和 136 meV,在价带上对空穴的有效势垒高度分别为 242 meV、378 meV 和 528 meV。与结构 A 和结构 B 相比,结构 C 对电子的有效势垒高度分别降低 213 meV 和 74 meV,对空穴的有效势垒高度分别增加了 286 meV 和 150 meV。以上结果表明:SSL EBL 对电子具有更高的有效势垒高度,更利于电子限制,对空穴具有更低的有效势垒高度,更利于空穴注入;WS HBL 对电子具有更低的有效势垒高度,更利于电子注入,对空穴具有更高的有效势垒高度,更利于空穴限制。这说明结构 C 的能带结构更有利于载流子向量子阱内注入,同时更能有效地将其限制在量子阱内。

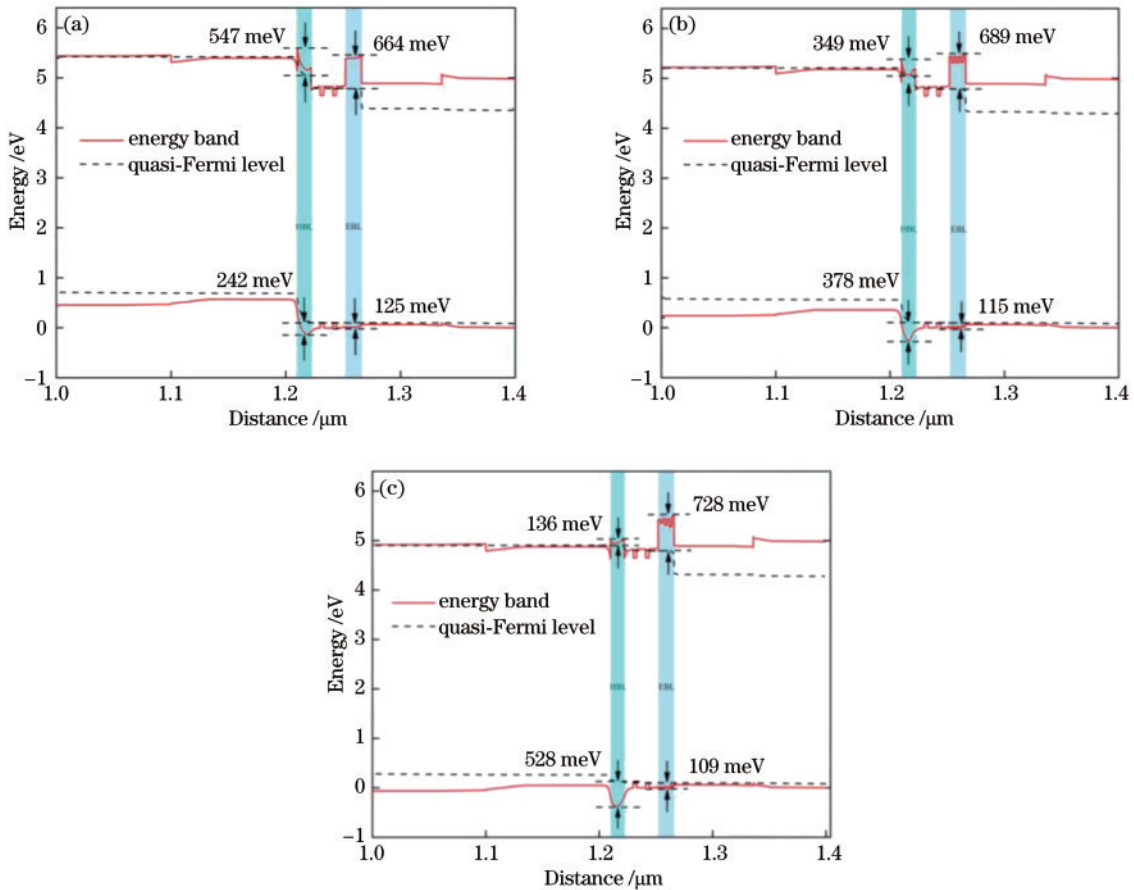


图 3 能带图与准费米能级图。(a)结构 A;(b)结构 B;(c)结构 C

Fig. 3 Band diagram and quasi-Fermi level diagram. (a) Structure A; (b) structure B; (c) structure C

量子阱内载流子浓度的提升和非有源区载流子泄漏的减少直观地表明了载流子注入效率的优化,因此对载流子浓度分布的研究不可或缺。在 DUV LDs 的工作过程中,部分电子和空穴在量子阱内复合产生光子,未能在量子阱内成功复合的载流子将泄漏至非有源区,这部分泄漏的载流子将减少 n 型区的电子浓度

和 p 型区的空穴浓度,对器件性能产生负面影响^[32]。因此,在量子阱内更高的载流子浓度和在非有源区更低的载流子泄漏意味着器件具有更好的性能。在注入电流为 95 mA、偏置电压为 4.5 V 的工作状态下,量子阱内的电子浓度、量子阱内的空穴浓度、p 型区的电子泄漏和 n 型区的空穴泄漏分别如图 4(a)~(d)所示。

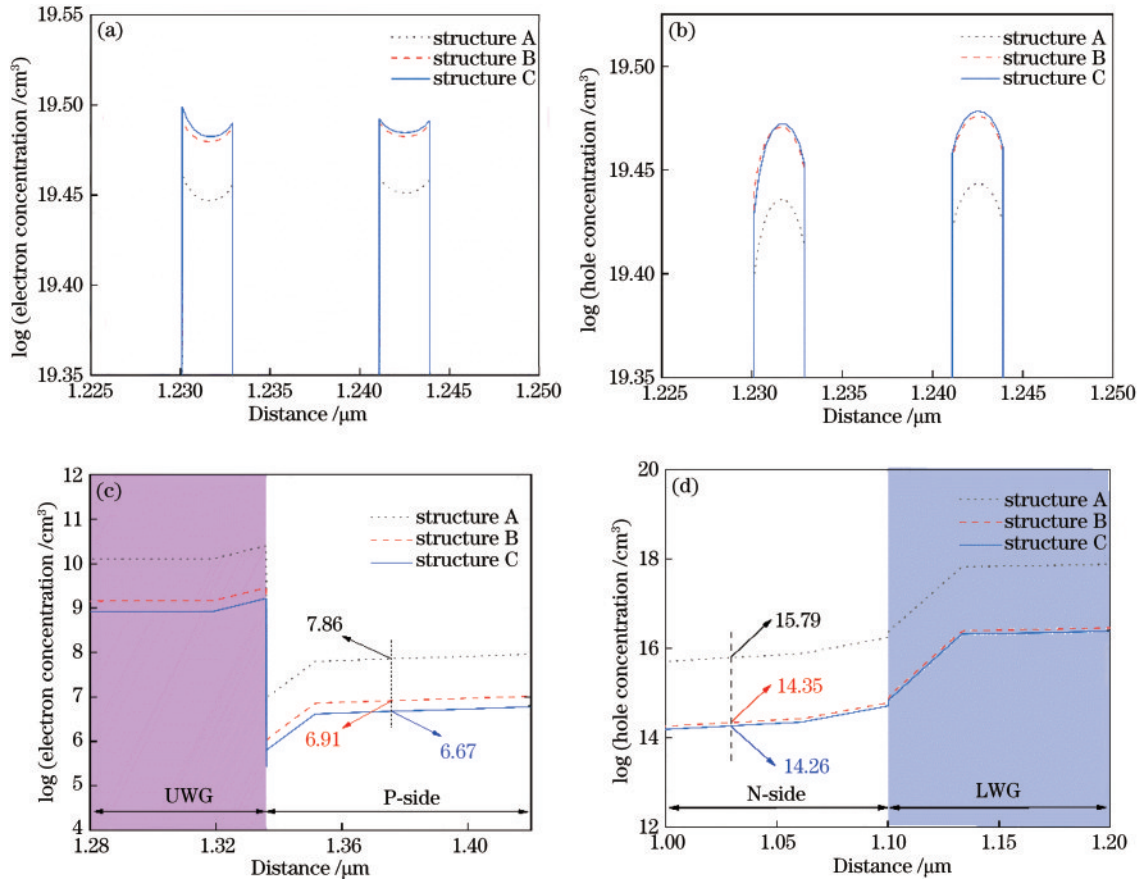


图4 载流子浓度分布。(a)量子阱内的电子浓度;(b)量子阱内的空穴浓度;(c)p型区的电子泄漏;(d)n型区的空穴泄漏。

Fig. 4 Distribution of carrier concentration. (a) Electron concentration in the QWs; (b) hole concentration in the QWs; (c) electron leakage in the p-type region; (d) hole leakage in the n-type region

相比结构 A 和结构 B, 结构 C 在量子阱内具有较高的电子浓度和空穴浓度。量化分析表明: 相比结构 A 和 B, 结构 C 在 p 型区的电子泄漏分别降低了 15.14% 和 3.47%; 在 p 型区的空穴泄漏分别降低了 9.69% 和 0.63%。以上结果表明, 在三种结构中, 结构 C 在量子阱内具有更高的载流子浓度, 在 p 型区和 n 型区分别具有更低的电子泄漏和空穴泄漏, 这说明 SSL EBL 和 WS HBL 能够更有效地增大载流子注入并减少载流子泄漏, 能对器件辐射复合率等性能的提升带来积极意义。

载流子在量子阱内有间接复合、俄歇复合和辐射复合等多种复合方式, 关于载流子的复合有一个经典的 ABC 模型, 计算公式^[33]为

$$I_{QW} = I_{SRH} + I_{Rad} + I_{Auger} = qV_{QW}(An + Bn^2 + Cn^3), \quad (7)$$

式中: q 为电子电量; V_{QW} 为所有量子阱的有效体积; n 为量子阱内的载流子浓度; A 、 B 和 C 分别为间接复合系数、辐射复合系数和俄歇复合系数。电子和空穴复合后能量以光子形式释放的复合方式定义为辐射复合^[34]。从以上关系式可知, 辐射复合率和载流子浓度的二次方成正比, 因此, 随着量子阱内电子和空穴浓度的增加, 辐射复合率也会有较为明显的提高。图 5(a)

为三种结构的辐射复合率对比图。由图中数据可知, 相比结构 A 和结构 B, 结构 C 的辐射复合率分别提升了 13.52% 和 0.65%。辐射复合作为深紫外激光二极管的发光机制, 对其发光性能起着决定性作用。量子阱内载流子浓度和辐射复合率的提升将对器件输出功率的提升带来积极影响。

图 5(b) 为三种结构的功率-电流 (P - I) 特性曲线, 其中 I_{th} 为阈值电流, η_{sc} 为斜率效率, P_{max} 为注入电流 95 mA 时, 激光器的输出功率。斜率效率 (η_{sc}) 定义为 P - I 曲线线性部分的斜率大小, 它体现了输出功率随电流增加而增加的能力, 结合其定义计算得到结构 A、B 和 C 的斜率效率分别为 1.23、1.67 和 1.73。

外微分量子效率 (η_D) 和内量子效率 (η_i) 也是衡量 DUV LDs 光电性能的重要参数, 它们不容易测量, 但可以由下式^[35]推导得到

$$\eta_D(I) = \frac{e\lambda}{hc} \frac{\partial P_{out}(I)}{\partial I} = \eta_i \frac{\alpha_{out}}{\alpha_i + \alpha_{out}}, \quad (8)$$

$$\eta_{sc}(I) = \frac{hc}{e\lambda} \frac{\int_{I_{th}}^I \eta_D(I) dI}{I - I_{th}}, \quad (9)$$

式中: P_{out} 和 I 为输出功率和电流的线性部分; c 是真空中光速; e 是电子电荷量; α_i 是内损耗; α_{out} 是输出损

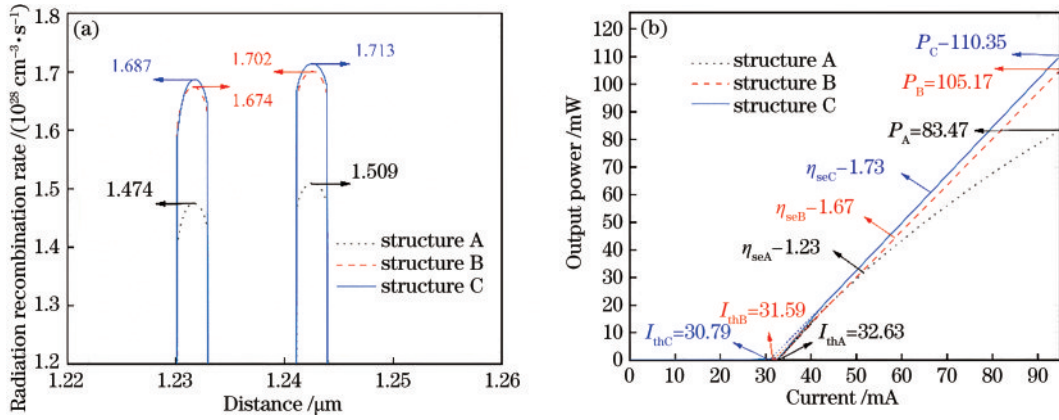


图 5 实验结果。(a)辐射复合率;(b) P - I 特性曲线

Fig. 5 Experimental results. (a) Radiation recombination rate; (b) P - I curves

耗。由式(8)和(9)推知,随着斜率效率的增加,外微分子量子效率和内量子效率均会增加,这表示结构 C 的光电性能得到了提升。

阈值电流定义为器件由自发辐射转化为受激辐射时的正向电流值,阈值电流的降低是激光二极管性能得到优化的一个关键指标^[36]。阈值电流密度(J_{th})可以由下式推导^[37]得到

$$J_{th} = J_0 \frac{d}{\eta_i} + \frac{d}{\Gamma \eta_i \beta} (\alpha_i + \alpha_{out}), \quad (10)$$

式中: β 和 J_0 为随温度变化的常量; Γ 为限制因子; d 是有源区在电流方向上的厚度; η_i 是内量子效率。由式(10)推得,相比结构 A,结构 B 和 C 的内量子效率提高,阈值电流密度随之减小,因而阈值电流减小。在实际计算中,阈值电流可由 P - I 曲线线性部分做反向延长线和 x 轴的交点得到。依据图 5(b)中数据计算得到三种结构的阈值电流分别为 32.63 mA、31.59 mA 和 30.79 mA。

输出功率 P_{out} ^[38]可表示为

$$P_{out} = \frac{\alpha_{out}}{\alpha_i + \alpha_{out}} \frac{I - I_{th}}{e} R_{rad} \hbar \omega, \quad (11)$$

式中: I 为注入电流; I_{th} 为阈值电流; R_{rad} 为辐射复合率;

ω 为光子的角频率。由式(9)可知,随着辐射复合率的增加和阈值电流的减小,输出功率也随之增加。由图 5(b)中数据可知,结构 A、B 和 C 的输出功率分别为 83.47 mW、105.17 mW 和 110.35 mW。相比结构 A 和 B,结构 C 的输出功率分别提升了 32.20% 和 4.93%。严重的电子泄漏导致了大量的空穴与电子在 p 型区发生非辐射复合,虽然量子阱内有较高的电子浓度,但较低的空穴注入效率限制了量子阱内辐射复合率的提升,这使得结构 A 的输出功率随输入电流呈非线性增长,因此,在阈值以上 P - I 曲线存在非线性。改进电子和空穴阻挡层后,结构 C 具有更好的载流子限制能力,同时超晶格结构的电子阻挡层增加了空穴注入效率,在量子阱内有足够的空穴和电子发生辐射复合,因此,结构 C 的输出功率随注入电流的增加呈线性增长。

载流子注入效率的提升也反映在阈值电压的减小上^[39]。图 6(a)为三种结构的电流-电压(I - V)曲线。结构 A、B 和 C 的阈值电压分别为 4.92 V、4.82 V 和 4.69 V,电阻分别为 5.39 Ω 、3.89 Ω 和 2.09 Ω 。相比结构 A 和 B,结构 C 的阈值电压分别减小了 4.67% 和 2.69%。这是由于阈值电流和电阻的减小,在器件两

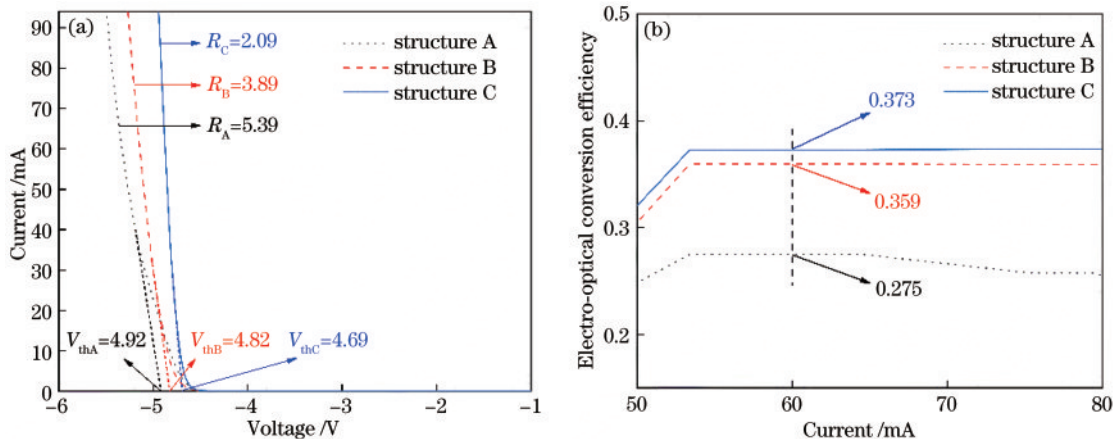


图 6 实验结果。(a)三种结构的 I - V 曲线;(b)三种结构的电光转换效率

Fig. 6 Experimental results. (a) I - V curves of three structures; (b) electro-optical conversion efficiency of three structures

端加上更小的电压即可得到更高的电流注入,这使得激光器更易满足阈值条件进入受激辐射状态,因而阈值电压减小。结构 C 的电阻减小至 2.09Ω ,这表明器件对电流阻碍作用的减小,意味着废热减少和转换效率的提升。

电光转换效率定义为输出光功率和输入电功率之比^[40],其为衡量 DUV LDs 光电性能的一个重要参数。图 6(b)为三种结构的电光转换效率对比图。相比于结构 A 和结构 B,结构 C 的电光转换效率分别增加了 35.6% 和 3.9%。随着阈值电流、阈值电压和电阻的减小,更小的输入功率就可以使器件达到出光阈值,随着辐射复合率的增大,器件的输出功率进一步增加,因此电光转换效率随之增加。由于较低的空穴迁移率和空穴注入效率,以及严重的载流子泄漏,结构 A 的电光转换效率随电流增长有一定的下降^[41]。而由于更好的空穴注入效率、更强的载流子限制能力和更高的辐射复合率,结构 C 的电光转换效率没有发生效率下降,而是缓慢平稳地升高^[42]。电光转换效率的提高意味着更多的光输出和更少热损耗,有利于设备的散热与小量化,同时能够节约能耗并延长器件的使用寿命。

4 结 论

本文提出了 SSL EBL 和 WS HBL 以提升 DUV LDs 的载流子注入效率,优化其工作性能。使用 Crosslight 软件对采用基础结构、RSL EBL 和 TS HBL、SSL EBL 和 WS HBL 的 DUV LDs 进行仿真对比。结果表明,SSL EBL 和 WS HBL 能够提升 DUV LDs 在量子阱内的载流子浓度,其辐射复合率也随之提升。SSL EBL 在导带上对电子和 WS HBL 在价带上对空穴均具有较高的有效势垒高度,这使得器件具有更好的载流子限制能力,减少了其非有源区的载流子泄漏。仿真与计算结果表明,当注入电流为 95 mA 时,阈值电流降低至 30.79 mA,斜率效率提升至 1.73,功率提升至 110.35 mW,阈值电压和电阻分别降低至 4.69 V 和 2.09Ω ,电光转换效率提升至 37.3%,DUV LDs 的主要性能均得以优化。本文通过采用 SSL EBL 和 WS HBL 有效地优化了 DUV LDs 的电学和光学性能,同时结合能带结构等物理机制分析了性能优化的原因,对 DUV LDs 的性能优化有一定的理论参考价值。

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] 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.
- [3] 李自力, 胡晓华, 熊诗圣. 亚十纳米导向自组装与深紫

外混合光刻技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922027.

Li Z L, Hu X H, Xiong S S. DSA in combination with DUV lithography for sub-10 nm manufacturing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922027.

- [4] 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.
- [5] Heilingloh C S, Aufderhorst U W, Schipper L, et al. Susceptibility of SARS-CoV-2 to UV irradiation[J]. *American Journal of Infection Control*, 2020, 48(10): 1273-1275.
- [6] Li X H, Detchprohm T, Kao T T, et al. Low-threshold stimulated emission at 249 nm and 256 nm from AlGaIn-based multiple-quantum-well lasers grown on sapphire substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(14): 141106.
- [7] 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.
- [8] Shimokawa M, Teramura S, Tanaka S, et al. Reduction of dislocation density in $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 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.
- [9] 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.
- [10] Yang J, Zhao D G, Liu Z S, et al. A 357.9 nm GaIn/AlGaIn multiple quantum well ultraviolet laser diode[J]. *Journal of Semiconductors*, 2022, 43(1): 010501.
- [11] Yen S H, Kuo Y K. Polarization-dependent optical characteristics of violet InGaIn laser diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(10): 103115.
- [12] Yu H B, Ren Z J, Memon M H, et al. Cascaded deep ultraviolet light-emitting diode via tunnel junction[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(8): 082503.
- [13] Lu T P, Li S T, Liu C, et al. Advantages of GaIn based light-emitting diodes with a p-InGaIn hole reservoir layer[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(14): 141106.
- [14] Yang X, Sun H Q, Fan X C, et al. Optimization on the luminous efficiency in AlGaIn-based ultraviolet light-emitting diodes by amendment of a superlattice hole reservoir layer[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2017, 101: 293-298.
- [15] Gupta H S, Ahmad S, Kattayat S, et al. Improvement in efficiency and luminous power of AlGaIn-based D-UV LEDs by using partially graded quantum barriers[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2020, 142: 106543.
- [16] Shi H Z, Gu H M, Li J H, et al. Performance improvements of AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes with specifically designed irregular

- sawtooth hole and electron blocking layers[J]. *Optics Communications*, 2019, 441: 149-154.
- [17] Zhang Z H, Zhang Y H, Bi W G, et al. On the hole accelerator for III-nitride light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(15): 151105.
- [18] 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.
- [19] Usman M, Munsif M, Anwar A R. Wedge-shaped electron blocking layer to improve hole transport and efficiency in green light-emitting diodes[J]. *Optics Communications*, 2020, 464: 125493.
- [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] Sato K, Yasue S, Yamada K, et al. Room-temperature operation of AlGaIn ultraviolet-B laser diode at 298 nm on lattice-relaxed $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}/\text{AlN}/\text{sapphire}$ [J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(3): 031004.
- [22] Zhang Z Y, Kushimoto M, Sakai T, et al. Design and characterization of a low-optical-loss UV-C laser diode[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, 59(9): 094001.
- [23] 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.
- [24] Sharif M N, Khan M A, Wali Q, et al. Performance enhancement of AlGaIn deep-ultraviolet laser diode using compositional Al-grading of Si-doped layers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152: 108156.
- [25] 杨倩, 韩琛惠, 米晓楠, 等. CALIOP 激光探测的运城地区气溶胶垂直分布特征[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(2): 0228004.
- Yang Q, Han C H, Mi X N, et al. Characteristics of aerosol vertical distribution in Yuncheng area based on CALIOP[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(2): 0228004.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [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] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学[M]. 7 版. 北京: 电子工业出版社, 2017: 298-299.
- Liu E K, Zhu B S, Luo J S. *Physics of semiconductors* [M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 298-299.
- [30] 李国华. 共振隧穿器件及其电路应用[J]. *物理*, 2001, 30(7): 436-440.
- Li G H. Resonant tunneling devices and their circuit applications[J]. *Physics*, 2001, 30(7): 436-440.
- [31] Shih Y H, Chang J Y, Sheu J K, et al. Design of hole-blocking and electron-blocking layers in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -based UV light-emitting diodes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, 63(3): 1141-1147.
- [32] Zhang Y H, Lv Q J, Zheng C D, et al. Recombination pathways and hole leakage behavior in InGaIn/GaN multiple quantum wells with V-shaped pits[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2019, 136: 106284.
- [33] Chen P, Feng M X, Jiang D S, et al. Improvement of characteristics of InGaIn-based laser diodes with undoped InGaIn upper waveguide layer[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(11): 113105.
- [34] Singha C, Sen S, Das A, et al. GaN/AlN multiple quantum wells grown by molecular beam epitaxy: effect of growth kinetics on radiative recombination efficiency[J]. *Thin Solid Films*, 2020, 709: 138216.
- [35] Crump P, Erbert G, Wenzel H, et al. Efficient high-power laser diodes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 1501211.
- [36] 张一, 杨成奥, 尚金铭, 等. 半导体带间级联激光器研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0114004.
- Zhang Y, Yang C A, Shang J M, et al. Research progress of semiconductor interband cascade lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0114004.
- [37] Tanaka S, Ogino Y, Yamada K, et al. AlGaIn-based UV-B laser diode with a high optical confinement factor[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(16): 163504.
- [38] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘. 激光原理[M]. 7 版. 北京: 国防工业出版社, 2014: 277-278.
- Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R. *Principle of laser* [M]. 7th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 277-278.
- [39] Huang H H, Chu S Y, Kao P C, et al. Enhancement of hole-injection and power efficiency of organic light emitting devices using an ultra-thin ZnO buffer layer[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 479(1/2): 520-524.
- [40] 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.
- [41] Hai X, Rashid R T, Sadaf S M, et al. Effect of low hole mobility on the efficiency droop of AlGaIn nanowire deep ultraviolet light emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(10): 101104.
- [42] 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.