



不规则H形量子势垒增强AlGa_N基深紫外发光二极管性能

鲁麟, 郎艺, 许福军, 郎婧, M SADDIQUE A K, 吕琛, 裴瑞平, 王莉, 王永忠, 代广珍

引用本文:

鲁麟, 郎艺, 许福军, 等. 不规则H形量子势垒增强AlGa_N基深紫外发光二极管性能[J]. *发光学报*, 2020, 41(6): 714–718.

LU Lin, LANG Yi, XU Fu-jun, et al. Performance Enhancement of AlGa_N-based Deep-ultraviolet Light Emitting Diodes by Employing Irregular H-shaped Quantum Barriers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(6): 714–718.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204106.0714>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

量子阱层和垒层具有不同 Al 组分的270/290/330 nm AlGa_N 基深紫外 LED 光电性能

270/290/330 nm AlGa_N-based Deep Ultraviolet Light-emitting Diodes with Different Al Content in Quantum Wells and Barriers
发光学报. 2017, 38(1): 57–62 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173801.0057>

近紫外380 nm发光二极管的量子阱结构优化

Structure Optimization of Multiple Quantum Wells in Near Ultraviolet Light Emitting Diodes with 380 nm Wavelength
发光学报. 2013, 34(5): 623–628 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133405.0623>

高效InGa_N/AlInGa_N发光二极管的结构设计及其理论研究

Simulation and Design of High Efficiency InGa_N/AlInGa_N Based Light-emitting Diodes
发光学报. 2016, 37(2): 208–212 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163702.0208>

高Al组分AlGa_N多量子阱结构材料发光机制探讨

Emission Mechanism of High Al-content AlGa_N Multiple Quantum Wells
发光学报. 2016, 37(5): 513–518 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163705.0513>

势垒硅掺杂对Ga_N基LED极化电场及其光电性能的影响

Effect of Si-doping on Barriers on Polarization Electric Field and Its Photoelectric Properties of Ga_N Based LED
发光学报. 2018, 39(10): 1445–1450 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183910.1445>

文章编号: 1000-7032(2020)06-0714-05

不规则 H 形量子势垒增强 AlGa_N 基 深紫外发光二极管性能

鲁 麟^{1,2*}, 郎 艺^{1,2}, 许福军³, 郎 婧³, M SADDIQUE A K³,
吕 琛^{1,2}, 裴瑞平^{1,2}, 王 莉^{1,4}, 王永忠^{1,4}, 代广珍^{1,2}

(1. 安徽工程大学 高端装备先进感知与智能控制教育部重点实验室, 安徽 芜湖 241000;

2. 安徽工程大学 电气工程学院, 安徽 芜湖 241000; 3. 北京大学物理学院 宽禁带半导体研究中心, 北京 100871;

4. 安徽工程大学 外国语学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 针对 AlGa_N 基多量子阱中有效的平衡载流子注入问题, 研究了有源区势垒层中 Al 组分调制形成的不规则 H 形量子势垒对 AlGa_N 基深紫外发光二极管(LED) 器件性能的影响及载流子的输运行为。研究发现, 与多量子阱中常用的单 Al 组分势垒相比, 加入 Al 组分较高的双尖峰势垒可以有效地提高内量子效率和光输出功率。进一步研究表明, 电子在有源区因凸起的尖峰势垒而得到了有效的阻挡, 减少了电子的泄露, 而空穴获得更多的动能从而穿过较高的势垒进入有源区。因此, 采用非对称 H 形量子势垒的深紫外 LED 器件中载流子输运实现了较好的平衡, 量子阱中的载流子复合速率远高于普通的深紫外发光二极管。

关键词: AlGa_N; 深紫外发光二极管; 量子势垒

中图分类号: TN304.23 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20204106.0714

Performance Enhancement of AlGa_N-based Deep-ultraviolet Light Emitting Diodes by Employing Irregular H-shaped Quantum Barriers

LU Lin^{1,2*}, LANG Yi^{1,2}, XU Fu-jun³, LANG Jing³, M SADDIQUE A K³, LYU Chen^{1,2},
PEI Rui-ping^{1,2}, WANG Li^{1,4}, WANG Yong-zhong^{1,4}, DAI Guang-zhen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Perception and Intelligent Control of High-end Equipment,
Ministry of Education, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China;

2. School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China;

3. Research Center for Wide Gap Semiconductor, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

4. School of Foreign Studies, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

* Corresponding Author, E-mail: LLu-wh@qq.com

Abstract: AlGa_N-based deep ultraviolet light-emitting diodes (DUV-LEDs) employing irregular H-shaped quantum barriers in the active region by modulating Al composition have been investigated. It has been found that the H-shaped quantum barriers by insertion of double spike barriers with higher Al composition can effectively improve both the internal quantum efficiency (IQE) and light output power (LOP) compared to commonly adopted single-Al-composition barrier for AlGa_N multiple quantum wells (MQWs). It is verified that electrons in the active region are effectively blocked by the raised barriers, while holes can gain more kinetic energy to cross the barrier height and then be

收稿日期: 2020-03-18; 修订日期: 2020-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(61306108); 教育部留学回国人员科研启动基金(2013693); 安徽工程大学拔尖人才计划(20190508)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61306108); Project-sponsored by SRF for ROCS, SEM(2013693); Program for The TOP talents of Anhui Polytechnic University(20190508)

injected into the active region. Thus the carrier recombination rate in the DUV-LEDs adopting the H-shaped quantum barriers can prevail much over the conventional one.

Key words: AlGaIn; deep ultraviolet light-emitting diodes; quantum barrier

1 引 言

作为一种重要的三元氮化物合金, AlGaIn 具有较高的电子饱和速率、介电常数和耐高温等特性^[1]。此外,它是禁带宽度在 3.4 ~ 6.2 eV 之间连续可调的直接带隙半导体^[2],其范围几乎覆盖整个紫外光谱。近年来,AlGaIn 基深紫外发光二极管(LED)在数据存储、生物医学、日常消毒、水和空气净化、光治疗等方面呈现了广泛的应用潜力^[3],因此是当前国际研究热点领域。

在 AlGaIn 材料中,电子浓度一般相对较高且迁移率较高,而空穴很难实现高浓度,并且迁移率较低,导致在有源区呈现非对称分布^[4]。而且空穴从 p 区向 n 区输运比较困难,这使得空穴在靠近 p 区的阱中浓度较高,离 p 区越远的阱中空穴浓度越低。除此之外,电子泄露也是深紫外 LED 器件中非常严重的问题。因而有效地平衡载流子注入的器件结构设计以及相应的机理研究显得极为重要^[5]。而为克服这个严重的载流子注入平衡问题,目前国际上提出了一些新型的结构设计,比如组分渐变的电子阻挡层^[6]、多层的量子势垒^[7]、组分渐变的量子势垒等^[8-10],因此,探索新颖的结构设计也是提高器件性能的重要途径。针对 AlGaIn 基多量子阱中电子阻碍效应和空穴有效注入问题,本研究工作中采用了一种不规则 H 形量子势垒策略,以平衡载流子的运输。本文通过 APSYS^[11] 软件进行二维数值模拟计算,并对其物理机制进行了分析和讨论。

2 结构设计与参数设置

图 1 展示了本研究中所用的两种不同结构,为便于分析,除量子阱有源区组成不同外,其余结构参数保持一致。图 1(a)所示的结构从最底层 c 平面的蓝宝石开始,上面是 1.5 μm 厚的 AlN 缓冲层和 0.5 μm 的 n 型 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ 。有源区由 5 对量子阱组成,其中 2.3 nm 厚的 $\text{Al}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{N}$ 量子阱和 10 nm 厚的 n 型掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 AlGaIn 量子垒,最后一层量子垒是 20 nm 厚的非掺杂 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ 。

随后是 10 nm 厚的 Mg 掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 AlGaIn 电子阻挡层和 50 nm 厚、p 型掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$,最后是 150 nm 厚的掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 p-GaN。图 1(c)所示为新型不规则 H 形量子垒结构(结构 B)。其中的有源区是由 n- $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ (2.5 nm)/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ (5.5 nm)/ $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ (2 nm) 组成。最后一层量子垒是由 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ (2.5 nm)/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ (17.5 nm) 组成。上述器件结构能通过金属有机物化学气相沉积系统(MOCVD)进行外延生长实现,建议的生长条件是:AlN 在 1 250 $^{\circ}\text{C}$ 温度下以 1 $\mu\text{m}/\text{h}$ 的速度进行生长。n-AlGaIn 和量子阱区分别在 1 150 $^{\circ}\text{C}$ 和 1 080 $^{\circ}\text{C}$ 下生长,具体细节已在我们以往的研究工作中进行了详细描述^[12]。

本文采用自洽 6 能带 k · p 理论计算能带结构和波函数^[13]。为了简化模拟,俄歇复合系数和 SRH 寿命分别设为 $1 \times 10^{30} \text{ m}^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 10 ns^[14]。能带偏移比 $\Delta E_c/\Delta E_v$ 设为 0.7/0.3^[15]。深紫外

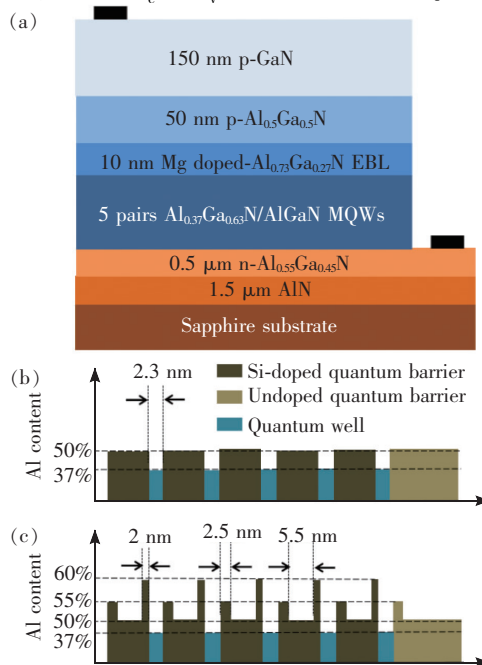


图 1 (a) AlGaIn 深紫外 LED 结构示意图; (b) 参考结构(结构 A); (c) 不规则 H 形量子阱结构(结构 B)。

Fig. 1 (a) Schematic DUV-LED structures of different MQWs designs. (b) Structure A. (c) Structure B.

LED 器件内部工作温度设为 300 K^[16]。内置的界面极化电荷根据 Fiorentini 等^[17]的公式进行计算,其中将 40% 的理论极化电荷密度用于解释固定缺陷和其他表面电荷的补偿。

3 结果与分析

图 2 给出了结构 A(参考结构)和结构 B(新结构)的内量子效率和光输出功率与注入电流密度的函数关系。可以看出,在整个注入电流密度范围内,结构 B 的光输出功率和内量子效率(IQE) η 始终优于结构 A。尤其是当注入电流密度达到 100 A/cm² 时,新型结构 B 的内量子效率和光输出功率较参考结构 A 分别提高到 1.08 倍和 1.07 倍。此外,当注入电流密度约为 65 A/cm² 时,结构 A 和结构 B 的最大 IQE 分别为 48.50% 和 52.18%。根据公式 $(\eta_{\max} - \eta_{\min})/\eta_{\max}$ 可得结构 A 和结构 B 的效率骤降率分别为 3.3% 和 1.3%。因此,与结构 A 相比,结构 B 的器件性能有了明显的改善,这可能是由于在有源区中载流子分布的调整以及空穴和电子波函数的重叠造成的。

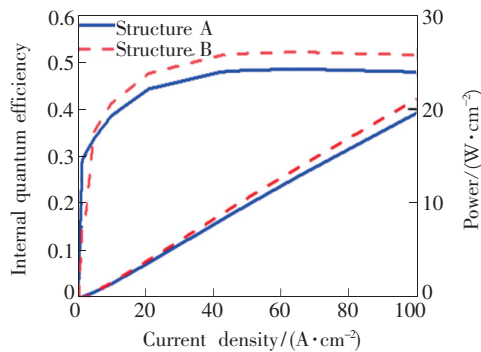


图 2 结构 A(参考结构)与结构 B(新结构)的光输出功率和内量子效率对电流密度的依赖关系

Fig. 2 Dependence of the LOP and IQE on injected current density for structures A (reference structure) and B (new structure)

为了更好地理解这种新型不规则 H 形量子阱结构提高深紫外 LED 性能的物理机制,我们选择注入电流为 100 A/cm² 时电场的分布情况与能带图为例进行详细分析。

图 3 为注入电流为 100 A/cm² 时有源区电场强度分布。众所周知,空穴的输运行为可以用以下公式来描述:

$$V_p = \mu_p E, \quad (1)$$

$$E_k = (1/2) m_h^* V_p^2, \quad (2)$$

其中 V_p 为空穴漂移速度, μ_p 为空穴迁移率, E 与 E_k 分别为静电场强度和动能, m_h^* 为空穴有效质量。可以看出,在 $[000\bar{1}]$ 方向上增加的电场强度会使空穴获得更大的动能,这将对空穴有效地注入有源区有很大帮助。通过计算,结构 A 与 B 在有源区内的平均电场强度分别为 3.59×10^4 V/cm 和 1.30×10^4 V/cm,因而相较于结构 A,结构 B 具有更小的平均电场强度,说明在结构 B 中采用不规则 H 形量子势垒时,附加了沿 $[000\bar{1}]$ 方向上的等效电场。考虑到不规则 H 形量子势垒是由高 Al 组分双尖峰势垒而形成的,附加的额外电场应归功于极化效应导致的量子势垒界面上的极化电荷,这在我们以往的研究中已进行了详细的阐述^[12]。

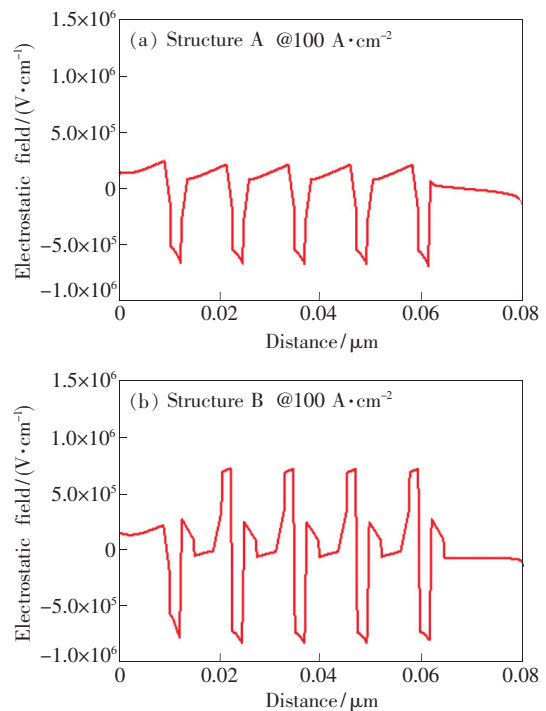


图 3 结构 A(a) 和 B(b) 在电流密度为 100 A/cm² 时的有源区电场分布

Fig. 3 Electric field profile in the active regions for structures A (a) and B(b) under the current density of 100 A/cm²

图 4 展示了在注入电流为 100 A/cm² 时 A 结构和 B 结构的能带图, A 结构和 B 结构的电子有效势垒高度分别为 220.71 meV 和 365.03 meV,这表明采用不规则 H 形量子势垒的 B 样品具有更强的阻挡电子泄露的能力。而对于空穴, A、B 结构的空穴有效势垒高度分别为 415.26, 404.07 meV,说明 B 结构更有利于空穴的有效注入。

图 5 分别展示了在电流密度为 100 A/cm² 时结

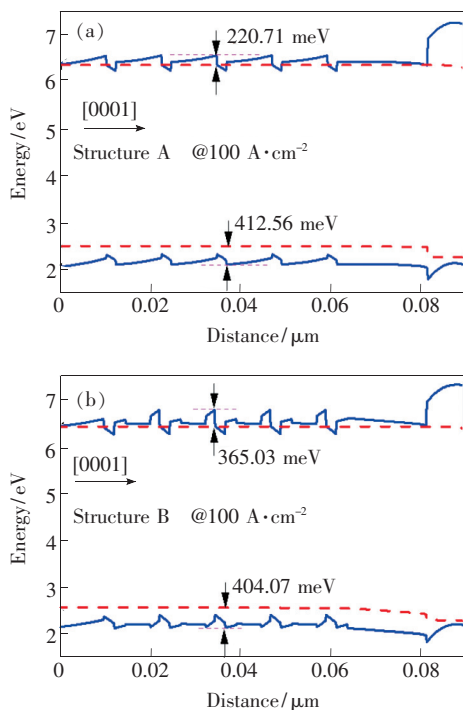


图 4 结构 A(a) 和 B(b) 在电流密度为 100 A/cm^2 时的能带图

Fig. 4 Energy band within the active regions of structures A (a) and B(b) under current density of 100 A/cm^2

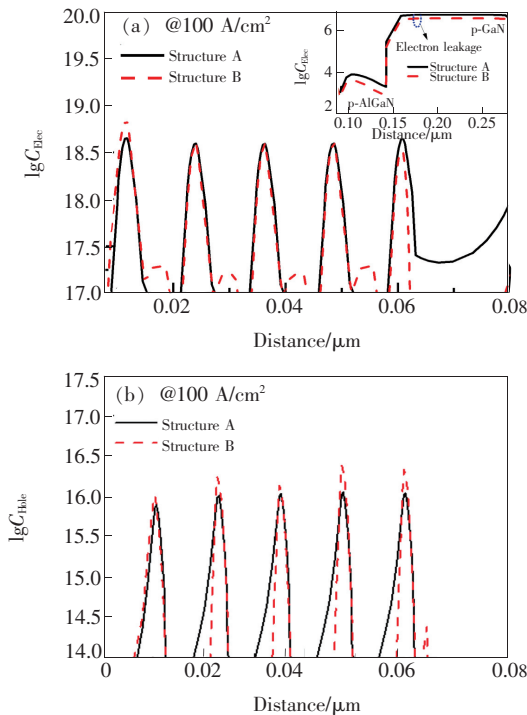


图 5 结构 A(a) 和结构 B(b) 在注入电流为 100 A/cm^2 时有源区的电子与空穴浓度分布

Fig. 5 Electron and hole concentration of structures A (a) and B(b) under current density of 100 A/cm^2

构 A 和 B 在有源区内电子和空穴的浓度分布情况。可以清楚地发现,结构 B 的电子浓度较结构 A 仅有轻微的变化,并且在量子阱之间积累了一些电子。图 5(a) 中的插图显示了电子在 p 区的泄露情况,显然,结构 B 的电子泄露量要远小于结构 A,这进一步证实了结构 B 中不规则的量子势垒设计可以有效地防止电子泄露。与此同时,如图 5(b) 所示,结构 B 中有源区的空穴浓度明显高于结构 A,显著改善了电子和空穴的非平衡注入问题。

为进一步比较两种结构的性能,我们分析了在注入电流为 100 A/cm^2 时两种结构的载流子的辐射复合情况。图 6 显示了结构 A 和 B 量子阱区域的平均辐射复合速率分布,可以发现结构 B 的平均辐射复合速率是结构 A 的 1.16 倍。另外,从图 6 也可以看出,结构 B 中的每一对量子阱中辐射复合速率都显著高于结构 A。结合图 5 中空穴与电子的浓度分布,这也进一步验证了不规则 H 形量子势垒调制的有源区中空穴浓度的增加是导致辐射复合速率增长的主要原因。

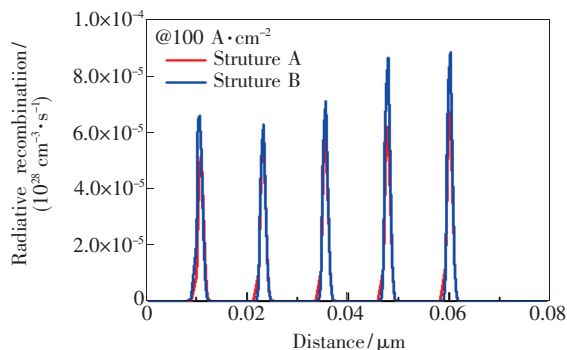


图 6 结构 A 与结构 B 在有源区的辐射复合速率分布
Fig. 6 Radiative recombination rates of the MQWs for structures A and B

4 结 论

综上所述,通过引入不规则 H 形量子势垒结构能有效地改善 AlGaIn 基深紫外 LED 器件的载流子平衡注入难题。与普通的深紫外发光 LED 相比,这种不规则 H 形量子势垒结构的 LED 器件结构在内量子效率和光输出功率上都有了很大的改善。研究结果表明,不规则 H 形量子势垒产生的电场调制效应使空穴获得了更多的动能,从而能够通过更高的势垒进入有源区。同时,较高的电子势垒有效地阻碍了电子逸出有源区,而较低的空穴势垒也有利于空穴有效注入。因此,采用不规则 H 形量子势垒的

结构设计中,器件的性能因空穴浓度的提高得到了极大的提升,从而有效地增加了载流子的辐射复合发光。我们的研究也表明,在常用的

单一 Al 组分的 AlGaIn 量子阱势垒中引入 Al 组分较高的尖峰非规则结构是一种提高 AlGaIn 基深紫外发光器件性能的有效途径。

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]. *Nat. Photonics*, 2019, 13(4):233-244.
- [2] HEC Y, WU Q, WANG X Z, *et al.*. Growth and characterization of ternary AlGaIn alloy nanocones across the entire composition range [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(2):1291-1296.
- [3] HIRAYAMA H, FUJIKAWA S, KAMATA N. Recent progress in AlGaIn-based deep-UV LEDs [J]. *Electron. Commun. Jpn.*, 2015, 98(5):1-8.
- [4] 李世彬, 肖战菲, 苏元捷, 等. 极化诱导实现 AlGaIn 薄膜材料中的超高电子浓度 (10^{20} cm^{-3}) 掺杂 [J]. *物理学报*, 2012, 61(16):163701-1-6.
LI S B, XIAO Z F, SU Y J, *et al.*. Polarization induced ultra-high electron concentration up to 10^{20} cm^{-3} in graded AlGaIn [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2012, 61(16):163701-1-6. (in Chinese)
- [5] KARMALKAR S, SATHAIYA D M, SHUR M S. Mechanism of the reverse gate leakage in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(22):3976-3978.
- [6] QIN P, SONG W D, HU W X, *et al.*. Improved performance of near UV light-emitting diodes with a composition-graded p-AlGaIn irregular sawtooth electron-blocking layer [J]. *Chin. Phys. B*, 2016, 25(8):088505-1-5.
- [7] ZHAO Y K, YUN F, WANG S, *et al.*. Mechanism of hole injection enhancement in light-emitting diodes by inserting multiple hole-reservoir layers in electron blocking layer [J]. *J. Appl. Phys.*, 2016, 119(10):105703.
- [8] SHEVCHENKO E A, NECHAEV D V, JMERIK V N, *et al.*. Enhanced photoluminescence efficiency in AlGaIn quantum wells with gradient-composition AlGaIn barriers [J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2016, 741(1):012118-1-5.
- [9] GUO WW, XU F J, SUN Y H, *et al.*. Performance improvement of AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes by inserting single spike barriers [J]. *Superlattices Microstruct.*, 2016, 100:941-946.
- [10] ZHANG C, SUN H Q, LI X N, *et al.*. Performance improvement of AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diodes with double electron blocking layers [J]. *Chin. Phys. B*, 2015, 25(2):028501.
- [11] CROSSLIGHT SOFTWARE INC. Crosslight APSYS software [EB/OL]. [2020-03-10]. <https://crosslight.com/products/apsys/>.
- [12] LANG J, XU F J, GE W K, *et al.*. High performance of AlGaIn deep-ultraviolet light emitting diodes due to improved vertical carrier transport by delta-accelerating quantum barriers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 114(17):172105-1-5.
- [13] LU L, ZHANG Y, XU F J, *et al.*. Performance improvement of AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes *via* Al-composition graded quantum wells [J]. *Superlattices Microstruct.*, 2018, 118:55-60.
- [14] LANG J, XU F J, GE W K, *et al.*. Greatly enhanced performance of AlGaIn-based deep ultraviolet light emitting diodes by introducing a polarization modulated electron blocking layer [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(20):A1458-A1466.
- [15] WEI S H, ZUNGER A. Valence band splittings and band offsets of AlN, GaN, and InN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69(18):2719-2721.
- [16] SHISHEHCHI S, ASGARI A, KHERADMAND R. The effect of temperature on the recombination rate of AlGaIn/GaN light emitting diodes [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2009, 41(7):525-530.
- [17] FIORENTINI V, BERNARDINI F, SALA F D, *et al.*. Effects of macroscopic polarization in III-V nitride multiple quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 1999, 60(12):8849-8858.



鲁麟(1980-),男,安徽芜湖人,博士后,教授,硕士研究生导师,2009年于北京大学获得博士学位,主要从事 III-V 族宽禁带半导体光电子材料及器件的研究。

E-mail: llu-wh@qq.com