

本文引用格式:武智波,贺龙飞,吴宗豪,等.近紫外 GaN 基量子阱结构的局域和极化效应[J].聊城大学学报(自然科学版),2025,38(2):218-223.

Citation format:WU Zhibo, HE Longfei, WU Zonghao, et al. Localization and polarization effects in near-ultraviolet GaN-based quantum well structures[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(2): 218-223.

文章编号 1672-6634(2025)02-0218-06

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024070014

近紫外 GaN 基量子阱结构的局域和极化效应

武智波¹,贺龙飞²,吴宗豪¹,徐明升¹,王成新³,徐现刚¹,冀子武¹

(1. 山东大学 集成电路学院,新一代半导体材料研究院,山东 济南 250100;2. 广东省科学院 半导体研究所,广东 广州 510650;3. 山东浪潮华光光电子股份有限公司,山东 潍坊 261061)

摘要 在具有蓝宝石衬底的 AlN 模板上外延生长了近紫外 In_{0.01}Ga_{0.99}N/Al_{0.15}Ga_{0.85}N 多量子阱结构,对其荧光(PL)特性进行了测量。结果显示,该结构的 PL 峰位能量和线宽的温度行为分别呈“S”形(降低-增加-降低)和“W”形(变窄-变宽-变窄-变宽),而其激发功率行为则分别呈“N”形(增加-降低-增加)和“V”形(变窄-变宽)。这些行为表明了该量子阱结构中载流子复合发光的局域特征和量子限制斯塔克效应的库伦屏蔽效应。前者被归因于阱厚起伏所导致的阱层内的势起伏,而后者则被归因于阱/垒晶格失配所诱发的极化电场。此外,该结构的积分 PL 强度的温度行为也证实了其阱层内局域深度的非均匀性。

关键词 近紫外 LED;GaN 基多量子阱;光致发光;局域效应;量子限制斯塔克效应

中图分类号 TN23;TB34

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Localization and Polarization Effects in Near-Ultraviolet GaN-Based Quantum Well Structures

WU Zhibo¹, HE Longfei², WU Zonghao¹, XU Mingsheng¹,
WANG Chengxin³, XU Xiangang¹, JI Ziwu¹

(1. School of Integrated Circuits, Institute of Novel Semiconductors, Shandong University, Jinan 250100, China;
2. Institute of Semiconductor Research, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;
3. Shandong Inspur Huaguan Optoelectronics Co., Ltd., Weifang 261061, China)

Abstract A near-ultraviolet InGaAlN multiple quantum well structure was epitaxially grown on an AlN template with a sapphire substrate, and its photoluminescence (PL) properties were measured. The measurement results show that the PL peak energy and linewidth respectively exhibit an S-shaped (decreasing-increasing-decreasing) and a W-shaped (narrowing-widening-narrowing-widening) temperature dependences, and an N-shaped (increasing-decreasing-increasing) and a V-shaped pattern (narrowing-widening)

收稿日期:2024-07-18

基金项目:国家自然科学基金项目(52272157,51872167);广州市基础科学研究计划项目(202201010679)资助

通信作者:冀子武,男,汉族,博士,教授,研究方向:低维(纳米)化合物半导体材料与器件的光学特性,E-mail:jiziwu@sdu.edu.cn;贺龙飞,男,汉族,博士,高级工程师,研究方向:化合物半导体(GaN、AlN、SiC 等)领域的 MOCVD 材料外延、器件设计与封装等,E-mail:helongfei@gdisit.com;王成新,男,汉族,博士,高级工程师,研究方向:化合物半导体外延片及光电子器件研发与生产,E-mail:chengxinwang05@163.com。

excitation power dependences. These behaviors show the localized characteristics, and Coulomb screening effect of quantum-confined Stark effect, of the carrier recombination in the structure. The former is ascribed to potential fluctuations caused by fluctuations of well widths, while the latter is attributed to the well/barrier lattice mismatch-induced polarization field. Furthermore, the temperature dependence of the integrated PL intensity of the structure also confirms the inhomogeneity in the depths of the localized states in the wells.

Key words near-ultraviolet LED; GaN based multiple quantum well; photoluminescence; localization effect; quantum-confined Stark effect

0 引言

近紫外线已经在工业、传感及医疗等诸多领域有着广泛应用,如油墨和涂料等的紫外固化^[1,2]、身份证和钞票的特征检测^[3]以及胆红素和血气的监测分析^[4]等。近些年来,随着 GaN 及其合金在制备技术上的不断突破,对基于 GaN 的近紫外发光二极管(NUV LED)的研发也日益引起相关研究工作者的重视,并取得了快速发展^[5-8]。与传统的紫外光源(如汞灯)相比,NUV LED 具有绿色环保、光效高、稳定性好等众多优点,因此成为替代传统光源的优先选择^[9,10]。

目前,波长范围在 370 nm 左右的 Al(In)GaN 基多量子阱(MQW)的 NUV LED,已经被作为泵浦源用于白光照明^[11-14]和显示^[15,16]等领域。然而,仍有许多制约其发光效率和光学性能的因素需要克服。首先,由于合适衬底的缺乏或高成本,Al(Ga)N 通常是在异质衬底(如 Al_2O_3)上外延而成,然而二者之间较大的晶格常数或热膨胀系数失配会不可避免地导致点缺陷或位错的产生。这些点缺陷或位错会随着生长外延至有源区,并且作为非辐射复合中心而影响器件的内量子效率^[17,18];其次,不同于 InGaN 基蓝光 LED,由于 NUV LED 的有源区中不含或含有极少的 In 组分,因而与 In 团簇相关的载流子局域效应较弱,所以 AlGaN 基 NUV LED 对位错十分敏感^[19,20]。此外,InGaN/AlGaN MQW 因阱/垒晶格失配所诱发的极化场,会导致有源区内量子限制斯塔克效应(QCSE)的发生(即电子和空穴分别处在阱内的两侧,发光效率下降)^[21,23]。因此,深入研究近紫外 InGaN/AlGaN MQW 结构的复合发光机制,对于改善其外延工艺和能带结构,提高其光学性能和量子效率具有重要的指导作用。

本研究采用磁控溅射(magnetron-sputtering)和金属有机化学气相沉积(MOCVD)相结合的方法,在(0001)面 Al_2O_3 衬底上外延制备了一种 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 基近紫外 MQW 结构,分别在较为宽广的激发密度($0.2\sim 500\text{ kW}/\text{cm}^2$)和温度范围内($6\sim 300\text{ K}$)对其荧光(PL)的温度和激发密度依赖特征进行了测量,并根据这些测量结果研究了该结构有源区的复合发光机制。

1 实验

首先使用 NAURA iTops A230 AlN 溅射系统,在 2 英寸蓝宝石衬底上沉积 30 nm 厚的 AlN 作为缓冲层。随后,采用 Aixtron 紧耦合喷头金属有机化学气相沉积(MOCVD)系统,在 AlN 缓冲层上外延生长 NUV MQW 结构,其基本结构如图 1 所示,包括 2 μm 厚的未掺杂 GaN 层,3 μm 厚的 Si 掺杂 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 层(掺杂浓度约为 $1.5\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$),7 个周期的 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ (4 nm)/ $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ (15 nm) MQW。

样品的 PL 的测量过程简述如下:液氮封闭循环装置作为冷源并辅之以温控仪,可使样品温度能在 $6\sim 300\text{ K}$ 的范围内被自由调控。波长为 213 nm 的 CryLas 脉冲型固体激光器作为激发光源(其脉宽和频率分别为 1 ns 和 1 kHz),其激发密度则可利用中性衰减片在 $0.2\sim 500\text{ kW}/\text{cm}^2$ 的范围内被自由调控。所采集到的 PL 信

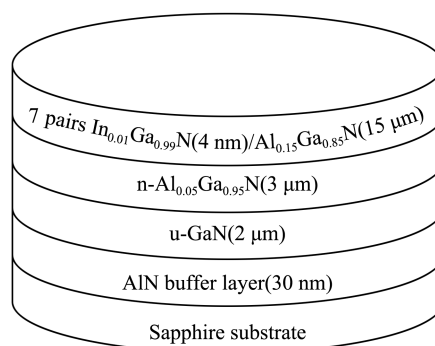


图 1 样品结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the sample

号首先由 iHR320 分光仪分解为单色光,随后再由计算机控制的 CCD(Synapse)进行光/电转换,最终以 PL 谱的形式呈现出来。

2 测试结果与分析

图 2(a)和(b)分别是样品在低(2 kW/cm^2)和高激发密度(500 kW/cm^2)时,其 PL 谱的温度依赖行为($6 \sim 300 \text{ K}$)。同时,图 2(c)和(d)分别展现了 PL 谱的峰位能量及线宽的溫度依赖性。由图 2(a)和(c)可见,在 2 kW/cm^2 的低激发功率下,随着温度上升,峰位和线宽分别呈现“S”形(红移-蓝移-红移)和“W”形(降低-增加-降低-增加)变化。这个行为是典型的载流子局域特征^[24,25],并且这些局域中心的形成被归因于阱层厚度不均一所引发的阱层内的势起伏^[25-28]。上述行为可简略解释如下:当温度从 6 K 升至约 70 K 时,浅局域载流子被热激活并以跳跃(hopping)方式弛豫到深局域态;然而,当温度大于 70 K 时,温度的增加会将深局域载流子热激发至浅局域能级,并最终摆脱局域中心的束缚而成为自由载流子,因此其最终的 PL 特征表现为遵从 Varshni 定律的禁带收缩效应(即自由载流子的一般热化效应)^[26]。

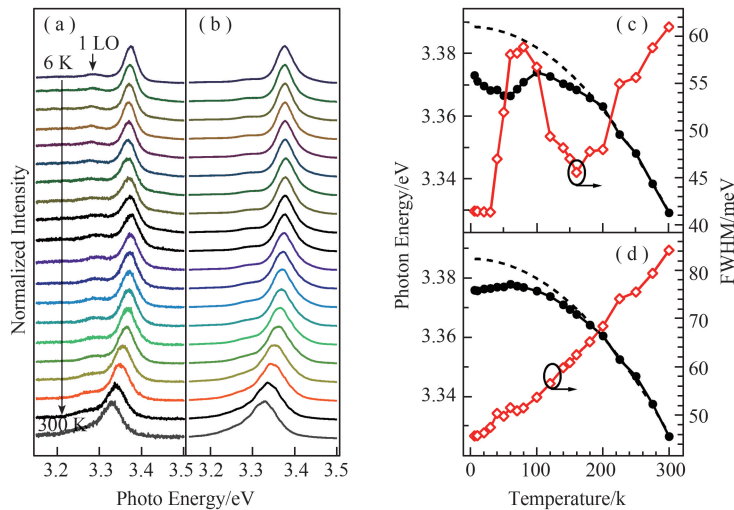


图 2 激发功率分别为(a) 2 kW/cm^2 和(b) 500 kW/cm^2 时样品的变温 PL 谱;(c)和(d)是分别对应于(a)和(b)的峰位能量及半高宽(FWHM)的温度依赖性,其中的虚线为 Varshni 拟合曲线

Fig. 2 Variable temperature PL spectra of sample at (a) 2 kW/cm^2 and (b) 500 kW/cm^2 ; (c) and (d) are temperature dependencies corresponding to the peak energy and full width at half maximums (FWHM) of (a) and (c), respectively, and the dashed lines represent Varshni fitting curves

然而,在 500 kW/cm^2 的高激发功率下[图 2(b)和(d)],该样品的峰位能量及半高宽(FWHM)却显示了一个不同的温度行为:随着温度的增加,峰位首先轻微地蓝移,然后红移(遵从 Varshni 定律)并直至 300 K ,同时,线宽在整个温度范围内单调增加。也就是说,与低激发功率条件下的情况不同,在高激发功率条件下,温度增加所引发的低温范围内的“峰位红移和线宽降低”这一行为没有被观察到。这个现象可被解释如下:在高激发功率下(相应于光生载流子的显著增加),由于局域态(尤其是深局域态)被载流子所饱和,因此在低温范围内温度增加所引发的载流子的弛豫效应显著减弱,取而代之的是局域载流子占据更高能级的热激发效应占据支配地位;然而,随着温度的进一步增加,浅局域载流子逐渐摆脱局域中心的束缚而成为自由载流子,因此和前述低激发密度(2 kW/cm^2)条件下的情况类似,其高温范围内的 PL 特征也表现为遵从 Varshni 定律的禁带收缩效应。

图 3(a)展示了低温(6 K)条件下样品的 PL 峰位和线宽的激发功率依赖性($0.2 \sim 500 \text{ kW/cm}^2$)。由图可见,其峰位和线宽的激发功率依赖行为分别是“N”形(增加-降低-增加)和“V”形(变窄-变宽)的。也就是说,在 $0.2 \sim 20 \text{ kW/cm}^2$ 的低激发功率范围内,随着激发功率的增加,PL 峰位首先蓝移(不大于 1 kW/cm^2)然后红移,同时线宽单调降低。这个行为显示了初始激发密度条件下(不小于 1 kW/cm^2)的辐射复合过程

是由 QCSE 的库伦屏蔽效应支配的^[29,30],并且随着激发密度的进一步增加(不小于 1 kW/cm^2)和 QCSE 的逐渐减弱,局域载流子的散射效应逐渐增强并开始占据支配地位。然而,当激发功率大于 20 kW/cm^2 时,由于深局域态逐渐变得饱和,局域载流子的散射效应逐渐减弱,同时浅局域态的填充效应不断增强并占据支配地位,因此,作为激发功率的一个函数,样品的 PL 峰位和线宽分别展现了一个蓝移和展宽的行为。

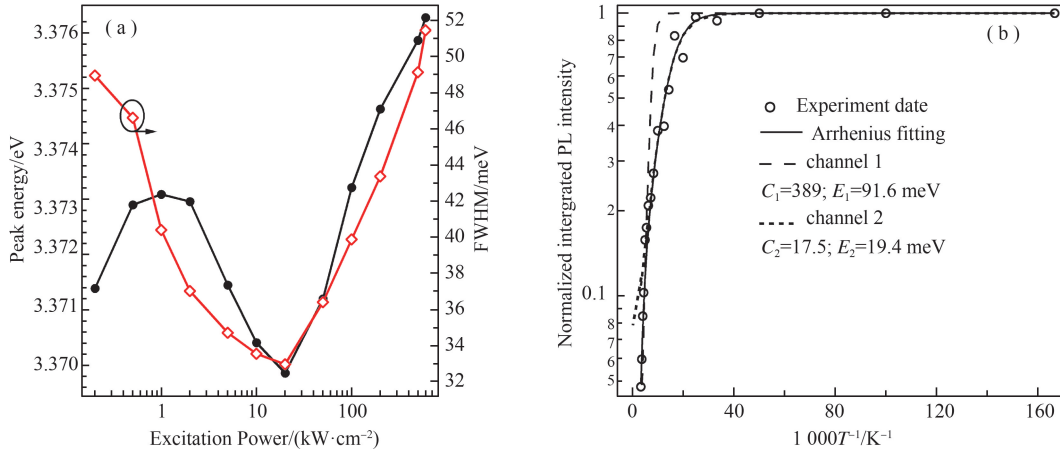


图3 (a) 6 K 温度下样品的 PL 峰位和半高宽的激发功率依赖行为; (b) 0.5 kW/cm^2 激发密度下样品的积分 PL 强度的温度依赖行为的阿伦尼乌斯图(空心圆)和它的拟合结果(实线)。

Fig. 3 (a) Excitation density dependencies corresponding to PL peak energy and FWHM at 6 K; (b) Arrhenius plot of normalized integrated PL intensity as a function of temperature (empty circles) and fitted curve (solid line) at 0.5 kW/cm^2

为了进一步探究样品 PL 的热猝灭机制,本研究使用双非辐射复合通道阿伦尼乌斯(Arrhenius)模型(式 1)来拟合、分析图 3(b)所示的 6 K 到 300 K 范围内的归一化积分 PL 强度的温度依赖性^[31,32]

$$I(T) = [1 + C_1 \exp(-E_1/k_B T) + C_2 \exp(-E_2/k_B T)]^{-1}, \quad (1)$$

式中 $I(T)$ 为 T 温度时的归一化积分 PL 强度; C_1 和 C_2 分别是不同非辐射复合通道中与非辐射中心密度相关的系数; E_1 和 E_2 分别是不同非辐射复合通道中与非辐射复合相关的活化能; k_B 是玻尔兹曼常数。通过拟合发现,上述的双非辐射复合通道阿伦尼乌斯模型与该样品的实验结果非常吻合,并且 C_1 和 C_2 分别为 389 和 17.5, E_1 和 E_2 分别为 91.6 和 19.4 meV。其中, C_1/E_1 和 C_2/E_2 分别对应于非辐射复合通道 1 和非辐射复合通道 2,如图 3(b)所示。这些拟合结果表明,温度增加所导致的 PL 的热猝灭过程,在低温范围内(小于 160 K)主要是起因于非辐射复合通道 2 的作用,而在高温范围内(大于 180 K)则主要是源自非辐射复合通道 1 的作用。

对于上述 PL 的热猝灭机制,可简要解释如下。对于量子阱,其非辐射复合通常被认为主要与阱内局域载流子的热解离(解离后成为阱内自由载流子)或阱内自由载流子的泄漏(溢出阱层)等过程有关。由于已知 InAlGaN 基量子阱结构中阱层和垒层的导带落差和价带落差的比例为 7 : 3^[33-35],并且该结构阱层和垒层的带隙大小也可通过魏加德定律(Vegard law)获得,因此我们可估算出该结构的阱、垒导带落差为 229.1 meV,并且这个落差远大于上述的活化能 E_1 和 E_2 的值,因此温度增加所导致的 PL 强度的降低不能被归因于载流子的泄露,而是归因于处于不同局域深度的载流子的解局域^[34,36,37],并且这里的 E_1 和 E_2 分别相应于深(非辐射复合通道 1)和浅局域载流子(非辐射复合通道 2)的活化能。

3 结论

采用磁控溅射和 MOCVD 相结合的方法在(0001)取向的蓝宝石衬底上外延了一种近紫外 $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 多量子阱结构,并对其进行了 PL 测试。测试结果显示,该结构的 PL 峰位能量和线宽的温度行为分别呈“S”形和“W”形,而其 PL 峰位能量和线宽的激发功率行为则分别是“N”形和“V”形的。前者被归因于有源区内存在着由阱厚起伏所诱发的局域深度非均一的局域态,并且反映了该结构随

温度增加的整个辐射过程,主要是由局域载流子的弛豫和随后的热激发,以及解局域载流子的一般热化这三个过程依次主导完成的;后者被归因于有源区内存在着由阱/垒界面晶格失配所导致的极化电场,反映了激发功率增加所诱发的浅局域载流子向深局域态的散射、量子限制斯塔克效应的库伦屏蔽和局域态(尤其是高能局域态)的填充效应依次主导了该结构的辐射过程。此外,该结构的积分 PL 强度温度行为的阿伦尼乌斯拟合结果(即两个非辐射复合通道的存在),也与上述结论(即阱层内存在着局域深度非均一的局域态)相吻合。期望上述关于近紫外 InGaN/AlGaN 量子阱结构的分析方法和研究成果,能对该领域或相关领域的高性能材料/器件研发提供有价值的实验数据和理论指导。

参 考 文 献

- [1] PARK T H, LEE T H and KIM T G. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlN}/\text{Al}$ -based backside diffuse reflector for high-brightness 370-nm AlGaN ultraviolet light-emitting diodes[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019,776:1009-1015.
- [2] KNEISSL M and RASS J. III-Nitride Ultraviolet Emitters: Technology and Applications[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [3] 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.
- [4] IWATA T, KATAGIRI T and MATSUURA Y. Real-time analysis of isoprene in breath by using ultraviolet-absorption spectroscopy with a hollow optical fiber gas cell[J]. *Sensors*, 2016,16(12):2058.
- [5] CHEN S and XU H. Electroluminescent materials toward near ultraviolet region[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021,50(15):8639-8668.
- [6] USMAN M, MALIK S and MUNSIF M. AlGaN-based ultraviolet light-emitting diodes: challenges and opportunities[J]. *Luminescence*, 2021,36(2):294-305.
- [7] XU C Z, CAI L, ZHENG J J, et al. The effect of different AlGaN insertion layer thicknesses on the photoelectric properties of InGaN/AlGaN near UV light emitting diodes[J]. *Results in Physics*, 2023,55:10711.
- [8] PARK A-H and SEO T-H. Hexagonal boron nitride as an intermediate layer for gallium nitride epitaxial growth in near-ultraviolet light-emitting diodes[J]. *Materials*, 2023,16(22):7216.
- [9] 文尚胜, 左文财, 周悦, 等. 紫外线消毒技术的研究现状及发展趋势[J]. *光学技术*, 2020,46(6):664-670.
- [10] SAHAR M A A Z M, HASSAN Z, NG S S, et al. Highly efficient near ultraviolet LEDs using InGaN/GaN/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /GaN multiple quantum wells at high temperature on sapphire substrate[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2023,156:107298:1-9.
- [11] HE L F, ZHANG K, WU H L, et al. Efficient carrier transport for 368 nm ultraviolet LEDs with a p-AlInGaN/AlGaN short-period superlattice electron blocking layer[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021,9(25):7893-7899.
- [12] ZACHAU M, BECKER D, BERBEN D, et al. Phosphors for solid state lighting-art. no. 691010[C]. // 12th Conference on light-emitting diodes-research, manufacturing, and applications XII, San Jose, California, United States, 2008.
- [13] 李金锋, 李宝慧, 刘学霞, 等. 红色荧光粉 $\text{Sr}_9\text{Zn}_{15}(\text{PO}_4)_7:\text{Eu}^{3+}$ 的制备及发光性质研究(英文)[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2018,31(3):24-30.
- [14] LI J, WANG J, HUANG F, et al. Structure and photoluminescence studies of $\text{Rb}_3\text{GdSi}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$ phosphor used for NUV converted white LEDs[J]. *Journal of Luminescence*, 2023,262: 119943.
- [15] PENG Y, LIANG R L, MOU Y, et al. Progress and perspective of near-ultraviolet and deep-ultraviolet light-emitting diode packaging technologies[J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2019,141(4): 040804.
- [16] LIN A, SETO T, WANG Y. Preparation and performance optimization of micrometer scale $\text{Ba}_{1.2}\text{Ca}_{0.7-x}\text{SiO}_4:0.1\text{Eu}^{2+}, x\text{Mn}^{2+}$ for application in mini led[J]. *Advanced Optical Materials*, 2024,12(2):2301347: 1-9.
- [17] LI Y, HUANG Y, LI Y, et al. Research progress of aluminum nitride gallium based deep ultraviolet light emitting diodes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(9): 0900002.
- [18] KHAN A, BALAKRISHNAN K, KATONA T. Ultraviolet light-emitting diodes based on group three nitrides[J]. *Nature Photonics*, 2008,2(2): 77-84.
- [19] XU M S, ZHOU Q B, ZHANG H, et al. Improved efficiency of near-ultraviolet LEDs using a novel p-type AlGaN hole injection layer[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2016,94:25-29.

- [20] TSAI T Y, WUU D S, TU J H, et al. Improved performance of near-ultraviolet light emitting diodes on selectively etched GaN templates[J]. *Electrochemical and Solid State Letters*, 2011,14(5):H222-H224.
- [21] LI Y, XING Z H, ZHENG Y L, et al. High-efficiency near-UV light-emitting diodes on Si substrates with InGaN/GaN/AlGaIn/GaN multiple quantum wells[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020,8(3):883-888.
- [22] XU C Z, CAI L, CHEN Z C, et al. Performance enhancement of InGaIn based near ultraviolet LEDs with asymmetric staggered quantum wells[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2024,56(2):133.
- [23] ISLAM A B M H, SHIN D-S, KWAK J S, et al. Determining the turn-on voltage of GaN-based light-emitting diodes: from near-ultraviolet to green spectra[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2023,12(12):126001.
- [24] 王绘凝. InGaIn/GaN 多量子阱的结构及其光学特性的研究[D]. 山东: 山东大学, 2014.
- [25] LI J, NAM K B, LIN J Y, et al. Optical and electrical properties of Al-rich AlGaIn alloys[J]. *Applied Physics Letters*, 2001,79(20):3245-3247.
- [26] ZENG J P, LI W, YAN J C, et al. Temperature-dependent emission shift and carrier dynamics in deep ultraviolet AlGaIn/AlGaIn quantum wells[J]. *Physica Status Solidi*, 2013,7:297-300.
- [27] TAMULAITIS G, MICKEVIČIUS J, KAZLAUSKAS K, et al. Efficiency droop in high-Al-content AlGaIn/AlGaIn quantum wells[J]. *Physica Status Solidi*, 2011,8(7-8):2130-2132.
- [28] SHATALOV M, YANG J W, SUN W H, et al. Efficiency of light emission in high aluminum content AlGaIn quantum wells[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009,105(7):073103.
- [29] BERNARDINI F, FIORENTINI V, VANDERBILT D. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides[J]. *Physical Review B*, 1997,56:R10024.
- [30] CHICHIBU S F, UEDONO A, ONUMA T, et al. Origin of defect-insensitive emission probability in In-containing (Al, In, Ga) N alloy semiconductors[J]. *Nature Materials*, 2006,5(10):810-816.
- [31] SUN Y P, CHO Y H, KIM H M, et al. High efficiency and brightness of blue light emission from dislocation-free InGaIn/GaN quantum well nanorod arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 2005,87(9):093115.
- [32] FRIEL I, THOMIDIS C, FEDYUNIN Y, et al. Investigation of excitons in AlGaIn/GaN multiple quantum wells by lateral photocurrent and photoluminescence spectroscopies[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004,95(7):3495-3502.
- [33] LI L, MIYACHI Y, MIYOSHI M, et al. Ultrathin inserted AlGaIn/InAlN heterojunction for performance improvement in AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Express*, 2019,12(1):011010.
- [34] 李金钊, 季桂林, 杨伟煌, 等. 高 Al 组分 AlGaIn 多量子阱结构材料发光机制探讨[J]. *发光学报*, 2016,37(5):513-518.
- [35] CHEN S C, LI Y, TIAN W, et al. Numerical analysis on the effects of multi-quantum last barriers in AlGaIn-based ultraviolet light-emitting diodes[J]. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 2015,118(4):1357-1363.
- [36] GUO Y N, ZHANG Y, WANG J X, et al. Development of AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diodes and laser diodes[C]. // 第十二届中国国际半导体照明论坛论文集. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [37] HWANG J S, GOKARNA A, CHO Y-H, et al. Direct comparison of optical characteristics of InGaIn-based laser diode structures grown on pendeo epitaxial GaN and sapphire substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 2007,90(13):131908.

(责任编辑:蒲锡鹏)