

基于组分渐变多量子阱 AlGaIn 基 LED 的紫外宽谱光源

胡博宇^{1,2}, 蒋 科^{1,2}, 张山丽^{1,2}, 刘客汐^{1,2}, 秦子越^{1,2}, 陈瑞华^{1,2},
张春月^{1,2}, 孙晓娟^{1,2*}, 黎大兵^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 特种发光科学与技术全国重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学 光电学院, 北京 100049)

摘要: 为克服传统 AlGaIn 基发光二极管光谱较窄的局限性, 本文通过设计有源区结构, 成功制备了 AlGaIn 基宽谱 LED。本研究通过平衡量子阱发光与 p 型 AlGaIn 层中的缺陷发光, 实现了光谱展宽。实验表明, 采用 Al 组分沿 c 轴方向递增的量子阱, 可在有源区靠近 p 侧形成有效势垒。该势垒减少了注入量子阱的空穴, 削弱了有源区的辐射复合, 并将大量空穴阻挡在 p 型层中, 从而增强了谱宽更大的缺陷发光, 使整体发射光谱展宽。额外引入高 Al 组分量子阱对光谱展宽的贡献有限, 其主要作为一高势垒影响载流子的注入和在多量子阱内的分布。最终, 量子阱 Al 组分沿 c 轴逐渐升高且各 Al 组分均设单量子阱的器件展现出最优的宽谱性能, 电致发光光谱半高全宽约为 41.4 nm。此外, 本研究将该器件与合束器结合, 演示了一种波长覆盖 260 nm 至 400 nm 波段的紫外光源系统, 证实其可有效拓展光谱范围、降低系统集成复杂度。本研究为开发结构紧凑、光谱可定制化的先进紫外光源系统奠定了坚实基础, 将推动紫外宽谱光源的实用化进程。

关 键 词: 宽光谱; 紫外光源; AlGaIn; LED; 多量子阱

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10.37188/CJL.20260178

CSTR: 32170.14.CJL.20260178

Ultraviolet Wide-spectrum Light Source Based on AlGaIn LED with Varied-Composition Multiple Quantum Wells

HU Boyu^{1,2}, JIANG Ke^{1,2}, ZHANG Shanli^{1,2}, LIU Kexi^{1,2}, QIN Ziyue^{1,2}, CHEN Ruihua^{1,2},
ZHANG Chunyue^{1,2}, SUN Xiaojuan^{1,2*}, LI Dabing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: sunxj@ciomp.ac.cn

Abstract: To overcome the narrow spectral width of conventional AlGaIn-based light-emitting diodes, we designed the active region and fabricated an AlGaIn-based broadband LED. We achieved spectral broadening by balancing quantum well emission and defect-related emission from the p-type AlGaIn layer. Experiments show that quantum wells with Al composition increasing along the c-axis create an effective barrier near the p-side of the active region. This barrier reduces hole injection into the quantum wells and weakens radiative recombination there. Meanwhile, it blocks numerous holes in the p-type layer and thus enhances defect emission, which exhibits a much broader spectrum. Consequently, the overall emission spectrum widens. An additional quantum well with high Al composition contributes little to further broadening. It mainly acts as a high barrier that affects carrier injection and distribution

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA0715600); 国家自然科学基金(62425408, 62121005, 12234018); 中国科学院青年创新促进会项目(2023223)

Supported by National Key Research and Development Program of China (2021YFA0715600); National Natural Science Foundation of China (62425408, 62121005, 12234018); Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (2023223)

among the multiple quantum wells (MQWs). The device with Al composition gradually increasing along the c-axis and a single quantum well at each Al fraction displays the best broadband performance, achieving an electroluminescence full width at half maximum (FWHM) of about 41.4 nm. This device was also combined with a beam combiner to demonstrate an ultraviolet light source covering 260 nm to 400 nm. This device effectively extends the spectral range and reduces system integration complexity. This work lays a solid foundation for compact and spectrally customizable advanced ultraviolet light sources and will promote the practical application of broadband ultraviolet sources.

Keywords: Broad spectrum; ultraviolet light source; AlGaIn; LED; MQWs

1 引 言

紫外宽光谱光源除了在杀菌消毒、紫外固化、光纤传感以及日盲紫外光通信等常见紫外光源的应用场景中具有广泛应用外^[1-5],还在众多科学研究与工业检测中扮演着核心角色。在环境监测领域,它被广泛应用于基于紫外分光光度法的多组分水质分析、大气有毒气体的在线监测,能够为分子吸光度测量提供连续平滑的背景谱线;在生物医疗诊断中,其宽光谱输出是实现高分辨率多光谱成像、生物分子荧光分析等设备的基础^[6,7]。作为一种直接带隙半导体,铝镓氮(AlGaIn)通过调控Al组分,可实现禁带宽度在3.4 eV到6.2 eV可调^[8-11],这使AlGaIn基发光二极管(light emitting diode, LED)发光波长能够覆盖200 nm至365 nm的较宽波段。同时AlGaIn基LED还具有体积小、寿命长、工作稳定及响应速度快等优势,这赋予其作为新型紫外宽光谱光源的巨大潜力。

然而,传统的AlGaIn基LED的发光光谱较窄,半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)通常仅为5 nm至20 nm^[12-16],无法直接用作宽光谱光源。尽管已有一些关于多波长AlGaIn基LED的报道,比如Li等人通过设计特殊的单层量子阱结构实现了双波段紫外发光^[17],该LED器件具有稳定可控的光谱特性;但多波长GaIn基LED的相关报道主要集中在可见光光谱^[18-22],而紫外波段的多波长LED则主要面向特定通信应用设计,其光谱由若干分立的窄发射峰构成,并非连续谱^[23-25]。而在分光分析中,光谱不连续会导致色散后特定波长单色光缺失,无法获取完整连续的分析谱线,因此同样无法满足紫外宽光谱光源的应用需求。

紫外宽光谱光源的实现途径主要有两种:一是通过调控LED器件的外延结构,实现无荧光粉的宽谱或者多波长LED;二是采用波长极短的紫外光激发荧光粉。但紫外波段的荧光粉光致发光效

率普遍偏低^[26-28],不仅对激励光源的功率提出了更高的要求,且导致最终输出光谱平坦度欠佳^[29]。此外,激发短波长的紫外光往往需要波长更短的紫外光亦或是X射线作为激励光源^[30-38],而理想的激励光源一般是体积小、全固态的LED。然而,波长在far-UVC波段(波长在250 nm以下)的LED往往效率极低^[7,39-41]。上述技术方案的局限性表明,使用较短波长的激发光源配合荧光粉难以实现一个体积小、光谱平坦、功耗低的紫外宽光谱光源。

相比之下,直接调控AlGaIn基LED外延结构,制备AlGaIn基宽谱LED实现紫外宽谱发射,有望规避荧光粉方案的诸多弊端。研究表明,量子阱层厚度等结构参数会影响载流子的捕获,进而影响量子阱内的载流子分布和辐射复合^[42,43]。然而,目前关于光谱连续的深紫外宽光谱单芯片LED的研究,几乎完全停留在理论计算与数值仿真阶段^[44,45]。基于此,优化器件外延结构,开发制备高性能的单芯片紫外宽谱LED,已成为该领域一个重要且富有挑战性的研究方向。

本文研究了有源区量子阱Al组分变化趋势和高Al组量子阱数量的影响规律,通过平衡器件中的量子阱发光以及p型AlGaIn层中的缺陷发光,获得了光谱连续的AlGaIn基宽谱LED器件,并利用该器件演示了一种紫外宽光谱光源。

2 实 验

2.1 实验制备

本文所述AlGaIn基宽谱LED外延结构采用金属有机化学气相沉积(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)系统,在高温热退火AlN/蓝宝石模板衬底上生长。实验制备的四种器件外延结构如图1中所示:在AlN/蓝宝石模板衬底上依次生长继续外延AlN层与AlN/AlGaIn超晶格结构以释放应力。在超晶格上生长n-

$\text{Al}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{N}$ 层和 $\text{n-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 层作为电子注入层。然后是多量子阱结构。四种器件仅在有源区结构上存在差异, 器件 1 的量子阱以及量子垒的 Al 组分沿 c 轴方向 (即 [0001] 方向) 递增且各 Al 组分均设单量子阱, 依次包含 Al 组分为 28%、32%、36%、46% 及 55% 的量子阱; 器件 2 的量子阱以及量子垒的 Al 组分沿 c 轴方向递减且各 Al 组分均设单量子阱, 依次包含 Al 组分为 55%、46%、36%、32% 及 28% 的量子阱; 器件 3 与器件 1 结构基本

一致, 仅在最靠近 p 侧增设一个 Al 组分为 55% 的量子阱; 器件 4 与器件 2 的结构基本一致, 仅在最靠近 n 侧增设一个 Al 组分为 55% 的量子阱。在有源区上生长了 $p\text{-Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ 层作为电子阻挡层 (Electron Blocking Layer, EBL), 用以阻挡电子泄漏, 提高器件的内量子效率。在电子阻挡层上生长了组分渐变的 $p\text{-Al}_{0.8-0}\text{Ga}_{0.2-1}\text{N}$ 空穴注入层。最后生长一层薄 $p\text{-GaIn}$ 层以提高 p 型欧姆接触质量, 并尽可能减少该层对紫外光的吸收。

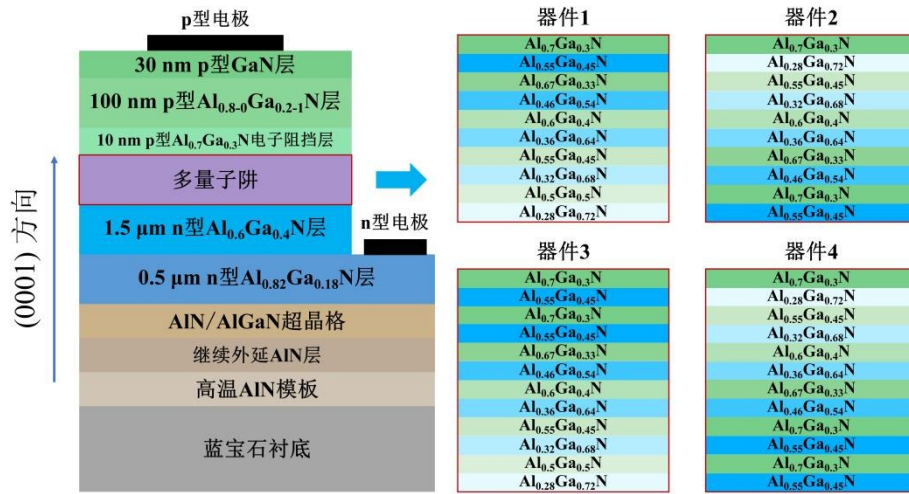


图1 器件1、2、3、4的外延结构示意图。

FIG. 1 Schematic diagram of the epitaxial structure of devices 1, 2, 3, and 4.

AlGaIn 宽谱 LED 采用标准深紫外 LED 器件工艺制备。台面使用感应耦合等离子体刻蚀 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 制备; 电子束蒸发和热蒸发设备沉积 $\text{V}/\text{Al}/\text{Ti}/\text{Au}$, 并在 850°C 和 N_2 氛围中快速热退火 30 s 制备 n 型接触电极; 电子束蒸发和热蒸发设备沉积 Ni/Au 电极, 并在 550°C 和 N_2 氛围中快速热退火 5 min 制备 p 型接触电极。器件性能表征方面, AlGaIn 宽谱 LED 器件采用 OCEAN-FX-XR1 OFX02916 光纤光谱仪在未经封装的裸芯片背面测得器件的电致发光 (Electroluminescence, EL) 光谱。

2.2 仿真验证

为进一步研究 AlGaIn 基宽谱 LED, 采用 AP-SYS 软件对其进行了仿真研究。该软件能够使用有限元方法, 依据模型设定的边界条件, 通过牛顿迭代法求解由泊松方程、电流连续性方程、漂移-扩散方程组成的方程组, 快速模拟半导体器件的能带结构、载流子浓度分布及输运等特性。模拟的器件台面宽度设置为 $400\mu\text{m}$, 各层厚度如图 1

中所示, $\text{n-Al}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{N}$ 层和 $\text{n-Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 层的 n 型掺杂浓度设置为 $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $p\text{-GaN}$ 层、 $p\text{-Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ 层和 $p\text{-Al}_{0.8-0}\text{Ga}_{0.2-1}\text{N}$ 层的 p 型掺杂浓度设置为 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。俄歇系数设置为 $1 \times 10^{-42} \text{ m}^6 \cdot \text{s}^{-1}$, Shockley-Read-Hall 复合寿命设置为 $1 \times 10^{-8} \text{ s}$, 量子阱的导带和价带偏移设置为 1:1, 界面极化电荷的屏蔽因子设为 0.4^[46]。

3 结果与讨论

3.1 有源区量子阱 Al 组分变化趋势对发光光谱的影响规律

图 2 为器件 1 和器件 2 在 40 mA 下的电致发光光谱以及仿真得到的有源区的能带结构与载流子分布对比。如图 2(a) 中所示, 发光光谱中波长为 260 nm-300 nm 的部分应主要来源于量子阱中的自发辐射, 而波长在 300 nm 以上的发光则可能源自器件中泄漏至 p 型层中的电子被缺陷所俘获引起的辐射复合^[47, 48]。具体而言, 该部分发光可能由电子泄漏至 p 型 AlGaIn 层后, 从而与 Mg 掺杂相关的深能级发生电子-中性受主 (electron-neu-

tral-acceptor)跃迁所致^[49-51]。在 260 nm-300 nm 波段内,器件 2 的发光强度高于器件 1,尤其是在波长为 250 nm 附近差异显著;而对于 300 nm 以上的波段,器件 1 的发光强度则整体高于器件 2。这一差异主要源于有源区量子阱 Al 组分变化趋势所引起的载流子浓度分布不同。如图 2(b)所示,器件 1 的量子阱 Al 组分沿 c 轴方向逐渐升高,在有源区靠近 n 侧形成了较深的势阱,同时在有源区靠近 p 侧形成了高且宽的势垒。如图 2(c)与图 2(d)所示,这种能带结构一方面将大量电子限制在有源区靠近 n 侧的低 Al 组分的阱中,另一方面阻

碍了 p 侧空穴注入,导致有源区内的空穴浓度相对于器件 2 更低,从而抑制了器件 1 有源区中的自发辐射。此外,器件 1 中有源区靠近 p 侧的高 Al 组分量子阱所形成的势垒还将大量空穴阻挡在有源区外,提高了 p 型 AlGaIn 层中的空穴积累,使少量泄漏至 p 型层的电子更容易与 Mg 相关深受主能级上的空穴发生辐射复合,从而增强长波缺陷相关发光。由于缺陷发光的光谱更宽,p 型层中缺陷发光更强的器件 1 具有更宽的光谱,其 FWHM 约为 41.4 nm,而器件 2 的 FWHM 仅有 38.1 nm。

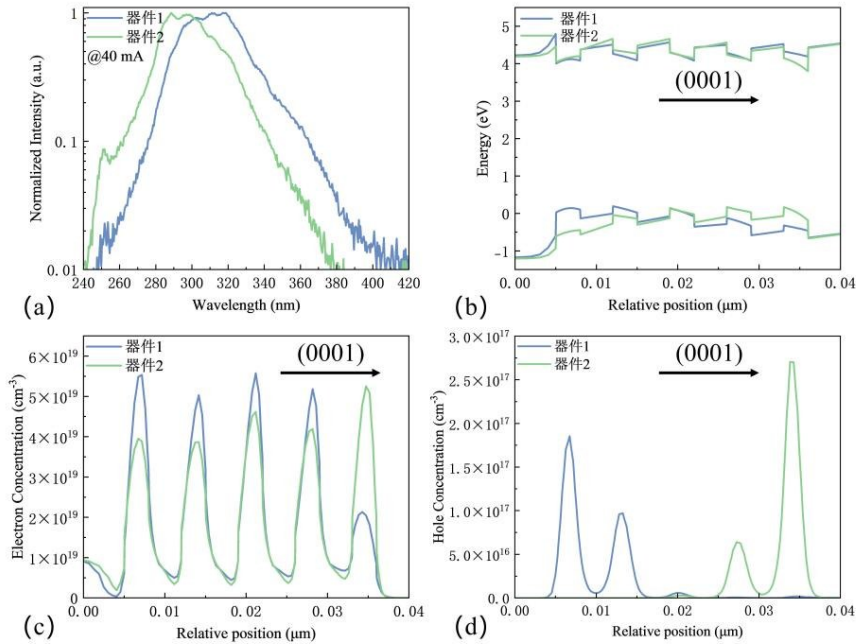


图 2 (a) 器件 1 和器件 2 在 40 mA 下的电致发光光谱。(b) 器件 1 和器件 2 的有源区能带结构。(c) 器件 1 和器件 2 有源区内的电子浓度。(d) 器件 1 和器件 2 有源区内的空穴浓度。

FIG. 2 (a) The electroluminescence spectra of Device 1 and Device 2 at 40 mA. (b) The band structure of the active region of device 1 and device 2. (c) The electron concentration in the active region of device 1 and device 2. (d) The hole concentration in the active region of device 1 and device 2.

图 3 为器件 3 和器件 4 在 40 mA 下的电致发光光谱及仿真得到的有源区的能带结构与载流子分布对比,器件 3 和器件 4 的 EL 光谱的 FWHM 分别为 37.9 nm 和 36.4 nm。对比器件 3、4 的发光光谱,如图 3(a)所示,二者差异与器件 1、2 所呈现的趋势类似:相较于器件 3,器件 4 在 260 nm-300 nm 波段的发光强度更高,而在 300 nm 以上部分的发光强度更低。该现象产生的原因也与器件 1 类似,器件 3 中高 Al 组分量子阱也在有源区靠近 p 侧形成了较高的势垒,将大量空穴阻挡在 p 型 AlGaIn 层中,多量子阱中的空穴浓度更低。

综上,量子阱 Al 组分沿 c 轴方向递增的有源区结构,会将大量电子聚集在有源区靠近 n 侧的低 Al 组分阱中,同时将大量空穴阻挡在有源区外,使其聚集在 p 型 AlGaIn 层中。这种载流子分布抑制了有源区中的量子阱发光,增强了 p 型 AlGaIn 层中的缺陷发光,使得器件 1 具有更宽发光光谱,光谱 FWHM 约为 41.4 nm。若仅考虑量子阱的发光,量子阱 Al 组分沿 c 轴方向逐渐降低的有源区结构具有更宽的光谱;考虑到缺陷发光带具有更宽的光谱,实际器件中量子阱 Al 组分沿 c 轴方向递增的有源区结构具有更宽的光谱。

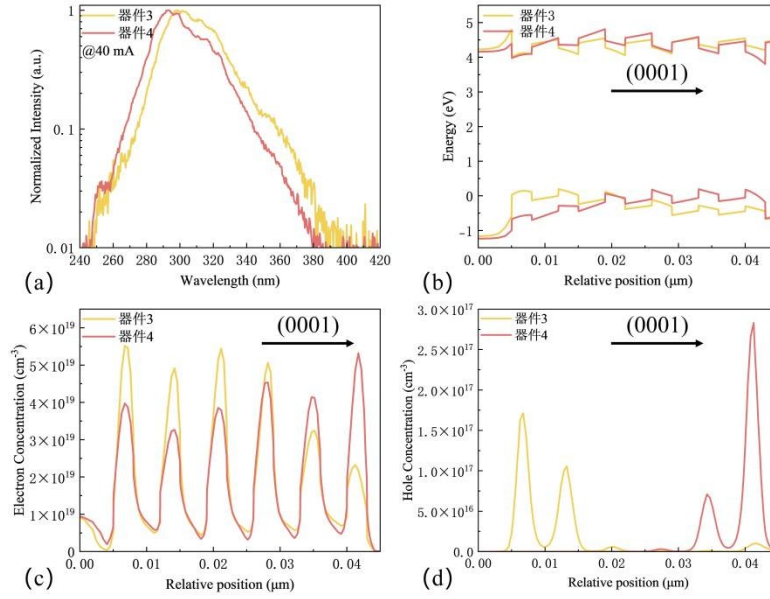


图3 (a) 器件3和器件4在40 mA下的电致发光光谱。(b) 器件3和器件4的有源区能带结构。(c) 器件3和器件4有源区内的电子浓度。(d) 器件3和器件4有源区内的空穴浓度。

FIG. 3 (a) The electroluminescence spectra of Device 3 and Device 4 at 40 mA. (b) The band structure of the active region of device 3 and device 4. (c) The electron concentration in the active region of device 3 and device 4. (d) The hole concentration in the active region of device 3 and device 4.

3.2 有源区高Al组分量子阱个数对发光光谱的影响规律

图4为器件1和器件3在40 mA下的电致发

光光谱及仿真得到的有源区的能带结构与载流子分布对比。如图4(a)所示, 器件3在260 nm-300 nm波段的发光强度与器件1基本一致, 在300 nm

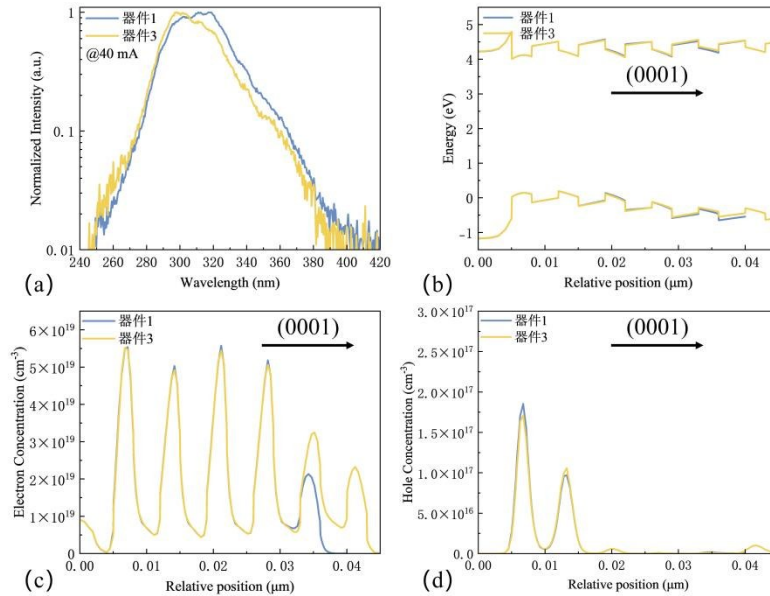


图4 (a) 器件1和器件3在40 mA下的电致发光光谱。(b) 器件1和器件3的有源区能带结构。(c) 器件1和器件3有源区内的电子浓度。(d) 器件1和器件3有源区内的空穴浓度。

FIG. 4 (a) The electroluminescence spectra of Device 1 and Device 3 at 40 mA. (b) The band structure of the active region of device 1 and device 3. (c) The electron concentration in the active region of device 1 and device 3. (d) The hole concentration in the active region of device 1 and device 3.

以上的波段,则整体弱于器件1。该现象主要归因于器件3相较于器件1在最靠近p侧增设了一个55%Al组分的量子阱,从而造成有源区及p型层中的载流子浓度分布差异。该附加高Al组分量子阱提高了电子向p侧输运的有效势垒,增强了电子阻挡层的电子阻挡能力,使器件3有源区中具有更高的电子浓度,抑制了电子向p型层Al-GaN的泄漏,从而削弱了器件3中p型AlGaN层中的缺陷发光。

图5(a)为器件2和器件4在40 mA下的电致发光光谱,图5(b)、(c)、(d)为器件2和器件4仿真得到的有源区的能带结构与载流子分布对比。如图

5(a)所示,二者光谱特征与器件3、4的对比结果相反:器件2在260 nm-290 nm波段的发光强度整体高于器件4,在300 nm以上的波段,则与器件4几乎一致。该差异可能源于器件4的有源区比器件2在最靠近n侧多1个组分为55%的量子阱,致使注入有源区的空穴聚集在Al组分较低的阱中,空穴浓度的提高增强了上述低Al组分阱中的自发辐射。此时Al组分较高的量子阱发光对光谱的贡献相对降低,在归一化光谱中表现出更弱的强度。如图5(e)中器件4相对其他器件在280 nm附近具有更高的电致发光强度也说明了器件4多量子阱中的自发辐射相对更强。

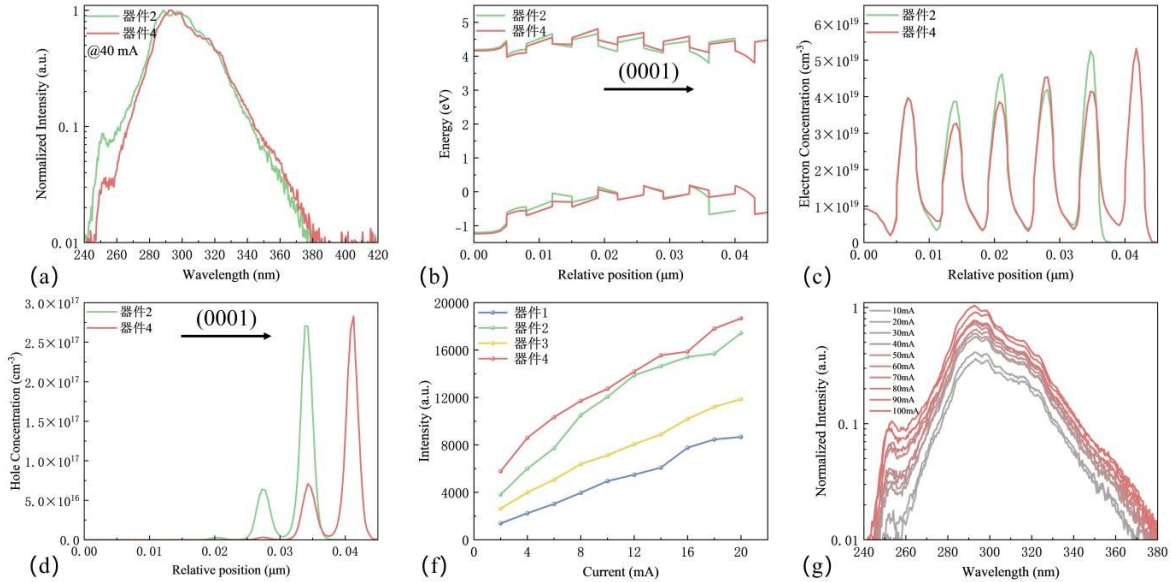


图5 (a) 器件2和器件4在40 mA下的电致发光光谱。(b) 器件2和器件4的有源区能带结构。(c) 器件2和器件4有源区内的电子浓度。(d) 器件2和器件4有源区内的空穴浓度。(e) 器件1、2、3、4的电致发光光谱在不同工作电流下280 nm处的强度值。(f) 器件4在注入电流为10 mA-100 mA下的电致发光光谱。

FIG. 5 (a) The electroluminescence spectra of Device 2 and Device 4 at 40 mA. (b) The band structure of the active region of device 2 and device 4. (c) The electron concentration in the active region of device 2 and device 4. (d) The hole concentration in the active region of device 2 and device 4. (e) The intensity values of electroluminescence spectra at 280 nm for devices 1, 2, 3, and 4 under different operating currents. (f) Electroluminescence spectra of Device 4 at injection currents ranging from 10 mA to 100 mA.

图5(f)为器件4在注入电流为10 mA-100 mA下的电致发光光谱,器件在10 mA-100 mA电流范围内均保持稳定的宽谱发光。其中,270 nm-300 nm的量子阱发光以及300 nm以上的缺陷发光占比相对稳定,而波长在250 nm-270 nm的发光则随电流的增大有所增强。该现象可能源于在电流较大时,原本低电流下难以俘获载流子的两个Al组分为55%的量子阱中相对更易俘获载流子,增强了这两个阱的辐射复合率,使其对器件总发光

贡献提高,从而表现出光谱中250 nm-270 nm的强度相对升高的现象。

综上,增设1个组分55%Al组分的量子阱对拓宽光谱作用有限,无法有效增强波长在260 nm附近发光。但据其插入的位置不同,将影响载流子向有源区的注入或由有源区向p侧的泄漏,从而影响器件光谱特性。当该量子阱位于最靠近p侧时,其所形成的势垒增强了电子阻挡能力,抑制了电子向p型层的泄漏,削弱了p型AlGaN层中的

缺陷发光, 导致光谱变窄; 而当其位于最靠近 n 侧时, 其所形成的势垒将阻挡空穴并使空穴聚集在有源区内 Al 组分更低的阱中, 增强了量子阱中的辐射复合, 并导致归一化光谱变窄。

3.3 全固态 AlGaIn 基 LED 紫外宽谱光源演示

全固态 AlGaIn 基 LED 紫外宽谱光源的结构如图 6(a) 所示, AlGaIn 基宽谱 LED 以及不同波长的 LED 由电源独立驱动, 各 LED 通过直接耦合的方式向输入光纤中输入不同波长的光, 来自不同 LED 的光经过合束器合并为一束光由输出光纤输出。

将输出光纤接入光纤光谱仪可以测得 AlGaIn 基 LED 紫外宽谱光源系统的发光光谱。所使用的 LED 光源包括 265 nm、278 nm、297 nm、307 nm、322 nm、341 nm 和 353 nm 的 LED, 各 LED 的输入电流依次为 50 mA、63 mA、15 mA、20 mA、35 mA、25 mA、25 mA。合束器输出的发光光谱如图 6(b) 中所示, 其 FWHM 约为 99.79 nm, 且并可通过更换所使用的 LED 光源以及改变 LED 光源的输入电流实现光谱谱线形状的定制化。各 LED 输入电流的差异主要源于不同 LED 的发光效率差异, 以及受到 LED 与光纤的对准差异所影响的 LED-光纤耦合效率差异。为获得较平坦的光谱, 部分发光效率及 LED-光纤耦合效率较高的 LED

需要降低输入电流, 以匹配其他 LED。光谱中还存在强度相对较低的谷, 这是由于所使用的 LED 光源中相邻两个波长的 LED 的峰值波长差距较大 (大于 15 nm) 所造成的, 若采用峰值波长更接近的 LED 能够有效抑制此类谷的出现。

当 LED 光源组合为 265 nm LED、AlGaIn 基宽谱 LED、322 nm LED、341 nm LED、353 nm LED、373 nm LED、385 nm LED 时, 发光光谱如图 6(b) 中所示, 其 FWHM 约为 124 nm。对比合束器输出光谱以及各子光源光谱可知, 中心波长约为 450 nm 的发光峰以及波长在 480 nm-640 nm 的发光带主要来自于 373 nm LED、385 nm LED 的寄生发光。进一步对比 AlGaIn 基宽谱 LED 与商用深紫外 LED 的发光光谱发现, 单个 AlGaIn 基宽谱 LED 的光谱宽度已接近三个商用 LED 组合才能达到的宽度。由于使用的合束器仅具有固定数量的输入光纤, 若全部使用商用 LED, 则无冗余光纤供 373 nm 和 385 nm 的 LED 接入; 而采用 AlGaIn 基宽谱 LED 时, 可用更少的输入光纤实现相同的光谱宽度, 从而获得冗余光纤以接入 373 nm 和 385 nm LED, 将系统的发光波段拓展至 260 nm-400 nm。因此, 使用 AlGaIn 基宽谱 LED 能有效拓宽光源系统的发光波段, 并降低对合束器的要求。

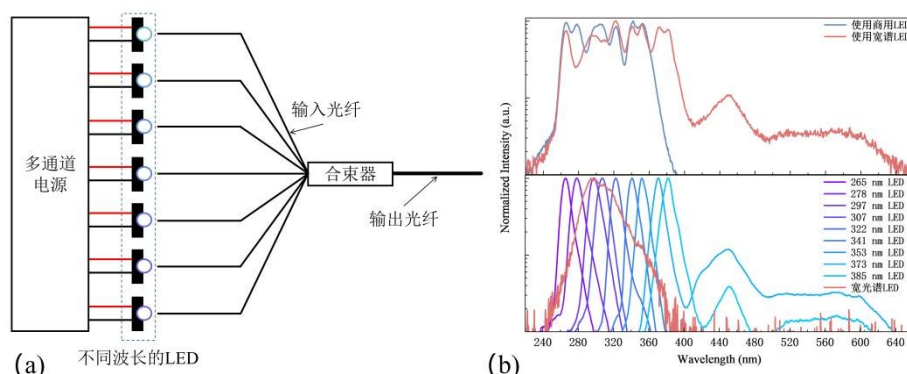


图 6 (a) 全固态 AlGaIn 基 LED 紫外宽谱光源的结构示意图。(b) 仅使用商用 LED 时与使用 AlGaIn 基宽谱 LED 后的光谱以及所有使用到的 LED 的光谱。

FIG. 6 (a) Schematic diagram of the structure of all-solid-state AlGaIn-based LED ultraviolet wide-spectrum light source. (b) The spectra when using only commercial LEDs and when using AlGaIn-based broadband LEDs, as well as the spectra of all LEDs employed.

4 结 论

本研究通过有源区结构设计制备了 AlGaIn 基宽谱 LED, 并基于该器件演示了一种紫外宽谱光源。研究表明, 为获得更宽的发光光谱, 需要平衡器件中的量子阱发光以及 p 型 AlGaIn 层中的缺陷

发光: 量子阱 Al 组分沿 c 轴方向逐渐升高的结构, 会将大量电子聚集在有源区靠近 n 侧的低 Al 组分阱中, 同时将大量空穴阻挡在 p 型 AlGaIn 层中, 削弱了有源区中的量子阱发光, 但增强了 p 型 AlGaIn 层中的缺陷发光, 由于缺陷发光带具有更宽的光谱, 实际器件中量子阱 Al 组分沿 c 轴方向递增的

有源区结构具有更宽的光谱;额外引入一个55%Al组分的量子阱,其作用取决于插入的位置,将会阻挡有源区中的载流子的注入或泄漏。当该量子阱位于最靠近p侧时,其所形成的势垒增强了电子阻挡能力,抑制了电子向p型层的泄漏,削弱了p型AlGaIn层中的缺陷发光,导致光谱变窄;而当其位于最靠近n侧时,其所形成的势垒将阻挡空穴并使空穴聚集在有源区内Al组分更低的阱中,增强了量子阱中的辐射复合,导致归一化光谱

变窄。最终,量子阱Al组分沿c轴逐级升高且各Al组分均设单量子阱的器件展现出最优的宽谱性能,电致发光光谱的FWHM约为41.4 nm。此外,本研究还使用AlGaIn基宽谱LED与合束器演示了一种发光波段在260 nm-400 nm的紫外宽谱光源,实验表明该器件能够有效拓宽光源系统的发光波段,降低光源系统对合束器的要求。本研究为开发结构紧凑、光谱可定制化的紫外光源系统奠定了基础,将推动紫外宽谱光源的实用化进程。

参 考 文 献:

- [1] LI D B, JIANG K, SUN X J, *et al.* AlGaIn photonics: recent advances in materials and ultraviolet devices [J]. *Advances in Optics & Photonics*, 2018, 10(1): 43.
- [2] KHAN A, BALAKRISHNAN K, KATONA T. Ultraviolet light-emitting diodes based on group three nitrides [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(2): 77-84.
- [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] KRESSE G, JOUBERT D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method [J]. *Physical Review B*, 1999, 59(3): 1758-75.
- [5] LI J, LIN J Y, JIANG H X. Growth of III-nitride photonic structures on large area silicon substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(17): 1999-FF26.
- [6] DOMES C, DOMES R, POPP J, *et al.* Ultrasensitive detection of antiseptic antibiotics in aqueous media and human urine using deep UV resonance raman spectroscopy [J]. *Analytical Chemistry*, 2017, 89(18): 9997-10003.
- [7] KUMAMOTO Y, TAGUCHI A, KAWATA S. Deep-ultraviolet biomolecular imaging and analysis [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(5): 1801099.
- [8] SHATALOV M, SUN W, LUNEV A, *et al.* AlGaIn deep-ultraviolet light-emitting diodes with external quantum efficiency above 10% [J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(8): 2101.
- [9] TAKANO T, MINO T, SAKAI J, *et al.* Deep-ultraviolet light-emitting diodes with external quantum efficiency higher than 20% at 275 nm achieved by improving light-extraction efficiency [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(3): 031002.
- [10] TANIYASU Y, KASU M, MAKIMOTO T. An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres [J]. *Nature*, 2006, 441(7091): 325-8.
- [11] ZHANG Y, JAMAL-EDDINE Z, AKYOL F, *et al.* Tunnel-injected sub 290nm ultra-violet light emitting diodes with 2.8% external quantum efficiency [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(7): 071107.
- [12] KHAN M A, YAMADA Y, HIRAYAMA H. Progress and outlook of 10% efficient AlGaIn-based (290 - 310 nm) band UVB LEDs [J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2024, 221(13): 2300581.
- [13] QIN Z, JIANG K, WANG B, *et al.* Quantum structure for efficient p-doping of AlGaIn with Al content over 70% [J]. *Applied Physics Letters*, 2026, 128(2): 022101.
- [14] JO M, ITOKAZU Y, HIRAYAMA H. Milliwatt-power far-UVC AlGaIn LEDs on sapphire substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(21): 211105.
- [15] ZHANG J, HU X, LUNEV A, *et al.* AlGaIn deep-ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(10R): 7250.
- [16] LIU K, JIANG K, WANG B, *et al.* Highly reflective Ni/Pt/Al p-electrode for improving the efficiency of an AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diode [J]. *Optics letters*, 2024, 49(14): 4.
- [17] LI T, SHENG B, LUO W, *et al.* Monolithic dual-wavelength AlGaIn-based UV-LEDs with controllable spectral profile [J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(6): 9.

-
- [18] LI Y, LIU C, ZHANG Y, *et al.* Realizing single chip white light InGaIn LED via dual-wavelength multiple quantum wells [J]. *Materials* (1996-1944), 2022, 15(11): 3998.
 - [19] YIN Y, CHEN R, HE R, *et al.* Strain visualization enabled in dual-wavelength InGaIn/GaN multiple quantum wells micro-LEDs by piezo-phototronic effect [J]. *Nano Energy*, 2023, 109: 108283.
 - [20] WANG Z, JIN Z, LIN R, *et al.* Vertical stack integration of blue and yellow InGaIn micro-LED arrays for display and wavelength division multiplexing visible light communication applications [J]. *Optic Express*, 2022, 30(24): 44260-9.
 - [21] LI P, ZHANG X, QI L, *et al.* Full-color micro-display by heterogeneous integration of InGaIn blue/green dual-wavelength and AlGaInP red LEDs [J]. *Optic Express*, 2022, 30(13): 23499-510.
 - [22] SAHA M, BISWAS A, KARAN H. Monolithic high performance InGaIn/GaN white LEDs with a tunnel junction cascaded yellow and blue light-emitting structures [J]. *Optical Materials*, 2018, 77: 104-110.
 - [23] MEMON M H, YU H, LUO Y, *et al.* Ultraviolet-visible dual-band mini-sized light emitting and detecting diode toward optical communication [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(14): 6828-32.
 - [24] ROY P G, SEN S, BHATTACHARYYA A. Wavelength-switchable ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(11): 3099-102.
 - [25] LU Y, GUO Y, LIU Z, *et al.* Monolithic integration of deep ultraviolet and visible light-emitting diodes for radiative sterilization application [J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 124(11): 111102.
 - [26] XU J, LIANG Q, LI Z, *et al.* Rational synthesis of solid-state ultraviolet B emitting carbon dots via acetic acid-promoted fractions of sp³ bonding strategy [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(17): 2200011.
 - [27] LENG M, YANG Y, ZENG K, *et al.* All-inorganic bismuth-based perovskite quantum dots with bright blue photoluminescence and excellent stability [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(1): 1704446.
 - [28] TANG L, JI R, CAO X, *et al.* Deep ultraviolet photoluminescence of water-soluble self-passivated graphene quantum dots [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(6): 5102-10.
 - [29] HUIMIN L, RAN P, LIHONG J, *et al.* Developing thermally stable defect-assisted phosphors of BaSc₂Ge₃O₁₀:Bi³⁺ for PC-UV-LEDs applications [J]. *Inorganic Chemistry*, 2023, 62(29): 11645-11653.
 - [30] WANG X, CHEN Y, LIU F, *et al.* Solar-blind ultraviolet-C persistent luminescence phosphors [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2040.
 - [31] WANG C, DENG M, TANG Y, *et al.* Crystal field engineering of Pr-activated gehlenite with bear golden ultraviolet C emission for 100% sterilization efficiency [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2023, 14(28): 6386-94.
 - [32] LIU Q, FENG Z Y, LI H, *et al.* Non-Rare-Earth UVC persistent phosphors enabled by bismuth doping [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(8): 2002065.
 - [33] LYU T, DORENBOS P. Bi³⁺ acting both as an electron and as a hole trap in La-, Y-, and LuPO₄ [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(23): 6240-9.
 - [34] LIU L, PENG S, GUO Y, *et al.* Designing X-ray-excited UVC persistent luminescent material via band gap engineering and its application to anti-counterfeiting and information encryption [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(36): 41215-24.
 - [35] FOLKERTS H F, HAMSTRA M A, BLASSE G. The luminescence of Pb²⁺ in alkaline earth sulfates [J]. *Chemical Physics Letters*, 1995, 246(1): 135-8.
 - [36] SONG S-Y, LIU K-K, WEI J-Y, *et al.* Deep-ultraviolet emissive carbon nanodots [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(8): 5553-61.
 - [37] ANTUZEVICIUS A, DOKE G, KRIEKE G, *et al.* Shortwave ultraviolet persistent luminescence of Sr₂MgSi₂O₇: Pr³⁺ [J]. *Materials*, 2023, 16(5): 13.
 - [38] WANG X, LI P, ZHENG S, *et al.* NIR-II luminescence and X-ray induced UV luminescence from Ce³⁺, Nd³⁺ co-doped NaLuF₄ phosphors [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 863: 158062.
 - [39] LIU K, JIANG K, WANG B, *et al.* Enhanced light extraction efficiency via double-mesa structure for 273 nm and 244 nm AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Optics & Laser Technology*, 2026, 193: 114229.
 - [40] KNEISSL M, RASS J. *III-Nitride Ultraviolet Emitters: Technology and Applications* [M]. Cham: Springer Series in Materials Science, 2016.
 - [41] LI J, GAO N, CAI D, *et al.* Multiple fields manipulation on nitride material structures in ultraviolet light-emitting diodes

- [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, (007): 010.
- [42] 邓建阳, 贺龙飞, 武智波等. 深紫外 AlGaIn 基多量子阱结构中载流子辐射复合的局域特征[J]. *发光学报*, 2023, 44(11): 1974-1980.
- DENG J Y, HE L F, WU Z B, *et al.* Localization features of carrier emission recombination in deep-ultraviolet AlGaIn-based multiple quantum well structure[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(11): 1974-1980. (in Chinese)
- [43] 陈贵楚, 贺龙飞, 彭坤. 量子阱厚度对 InGaIn 单量子阱发光二极管静态和动态特性的影响[J]. *发光学报*, 2026, 47(02): 314-320.
- CHEN G C, HE L F, PENG K. Impact of well thickness on static and dynamic behavior of InGaIn light-emitting diode with single quantum well[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2026, 47(02): 314-320. (in Chinese)
- [44] LIU Z, LU Y, CAO H, *et al.* Multi-wavelength and broadband AlGaIn-based LED for versatile and artificial UV light source [J]. *Micro and Nanostructures*, 2024, 187: 207755.
- [45] TIAN K, PEI Z, FENG S, *et al.* Physical models and numerical modeling for 280 nm AlGaIn-based emission-and-detection dual functional integrated devices by managing hole transport and recombination [J]. *Optics Express*, 2025, 33: 10609-20.
- [46] CHU C, TIAN K, CHE J, *et al.* On the origin of enhanced hole injection for AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diodes with AlN insertion layer in p-electron blocking layer [J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): A620-A8.
- [47] LI J, ODER T N, NAKARMI M L, *et al.* Optical and electrical properties of Mg-doped p-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(7): 1210-2.
- [48] SHATALOV M, CHITNIS A, MANDAVILLI V, *et al.* Time-resolved electroluminescence of AlGaIn-based light-emitting diodes with emission at 285 nm [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(2): 167-9.
- [49] ZHANG J C, ZHU Y H, EGAWA T, *et al.* Suppression of the subband parasitic peak by 1nm i-AlN interlayer in AlGaIn deep ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(13): 131117.
- [50] WANG Q, CONNIE A T, NGUYEN H P T, *et al.* Highly efficient, spectrally pure 340 nm ultraviolet emission from $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ nanowire based light emitting diodes [J]. *Nanotechnology*, 2013, 24(34): 345201.
- [51] ZHANG J, WU S, RAI S, *et al.* AlGaIn multiple-quantum-well-based, deep ultraviolet light-emitting diodes with significantly reduced long-wave emission [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(17): 3456-3458.



胡博宇(2001—),男,湖南永州人,微电子学与固体电子学专业硕士研究生在读,致力于 AlGaIn 基深紫外 LED 的研究。
E-mail: huboyu23@mails.ucas.ac.cn



孙晓娟(1981—),女,辽宁朝阳人,博士研究生,研究员,2012 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事 AlN 基材料生长与光电子器件的研究。
E-mail: sunxj@ciomp.ac.cn