

# 超晶格电子阻挡层周期数对 AlGaIn 基深紫外发光二极管性能的影响\*

刘举<sup>1)</sup> 曹一伟<sup>1)</sup> 吕全江<sup>1)†</sup> 杨天鹏<sup>2)3)</sup>  
米亭亭<sup>3)</sup> 王小文<sup>3)</sup> 刘军林<sup>1)‡</sup>

1) (江苏大学材料科学与工程学院, 镇江 212013)

2) (圆融光电科技股份有限公司, 马鞍山 243000)

3) (马鞍山杰生半导体有限公司, 马鞍山 243000)

(2023 年 12 月 14 日收到; 2024 年 3 月 22 日收到修改稿)

在 AlGaIn 基深紫外发光二极管 (DUV-LEDs) 中设计了具有不同周期数的超晶格电子阻挡层 (SL-EBL) 结构, 研究了 SL-EBL 周期数对 DUV-LEDs 发光效率、 $I$ - $V$  特性、可靠性及有源区载流子复合机制的影响. 研究表明, 随着 SL-EBL 的周期数增加, DUV-LEDs 的光输出功率 (LOP)、外量子效率 (EQE) 和电光转换效率 (WPE) 均呈先上升后下降的趋势, 同时泄漏电流减小, 可靠性提升. 当周期数为 7 时 (厚度为 28 nm), DUV-LEDs 裸芯的 EQE 和 WPE 均达到最大值, 在 7.5 mA 注入电流下分别为 3.5% 和 3.2%. 能带模拟结果证明了增加 SL-EBL 周期数可以有效提升电子势垒高度, 而几乎不改变空穴势垒高度. 然而, 当 SL-EBL 超过一定厚度时, 抑制了空穴向有源区的注入, 导致 EQE 和 WPE 随 SL-EBL 周期数变化出现拐点. 研究了 SL-EBL 周期数对 DUV-LEDs 载流子复合机制的影响, 发现增加 SL-EBL 周期数可以有效地降低有源区内载流子非辐射复合.

**关键词:** 深紫外发光二极管, 电子阻挡层, 可靠性, 外量子效率

**PACS:** 85.60.Jb, 73.61.Ey, 78.20.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.73.20231969

## 1 引言

近年来, GaN 基深紫外发光二极管 (deep ultraviolet light-emitting diodes, DUV-LEDs) 在消毒杀菌、空气净化、气体传感、紫外光疗以及非视距通信等领域的应用日趋成熟, 受到了广大研究人员的青睐<sup>[1-4]</sup>. 尤其是在全球新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 爆发期间, 有研究团队已经证明了经过发光波长为 270—280 nm 的 DUV-LEDs 照射可以有效地杀死新型冠状病毒<sup>[5]</sup>. 此外, 根据国际水俣公约, 传统的汞灯等紫外光源必将退出市场<sup>[6]</sup>,

而相比于传统汞灯, DUV-LEDs 具有无毒环保、体积小、寿命长、能耗低以及波长可调等优点<sup>[7]</sup>. 然而, 尽管研究人员已经在外延生长、结构设计以及封装技术等领域付出了巨大的努力, 但是 DUV-LEDs 的发展仍然受限于较低的外量子效率 (external quantum efficiency, EQE) 和电光转换效率 (wall plug efficiency, WPE)<sup>[8,9]</sup>. 目前, 一般 DUV-LEDs 的 EQE 低于 10%, WPE 低于 5%, 远低于 InGaIn 基蓝光 LED (> 80%)<sup>[5,10]</sup>. 因此, 提升 DUV-LEDs 的发光效率以及可靠性已经成为重要的研究课题.

AlGaIn 基 DUV-LEDs 的 EQE 取决于内量子效率 (internal quantum efficiency, IQE) 和光提取

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62374076, 62104085) 和江苏省双创团队项目 (批准号: JSSCTD202146) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lvquanjiang@ujs.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: liujunlin@ujs.edu.cn

效率 (light extraction efficiency, LEE), 其中, IQE 与载流子注入效率和有源区的载流子辐射复合效率有关 [11]. 除了采取改善外延层晶体质量 [12]、提高 Mg 掺杂效率 [13] 以及增加电子和空穴的波函数重叠 [14] 等方式提高 IQE 以外, 优化电子阻挡层 (electron-blocking layer, EBL) [15] 同样可以依靠改善载流子注入情况提升 IQE. 目前, 研究人员已经提出了许多 EBL 优化方案来提高载流子注入效率和限制能力. So 等 [16] 采用了渐变超晶格 EBL (GSL-EBL) 结构代替传统的单层 EBL 结构, 通过仿真研究表明 GSL-EBL 的极化电场有利于增加空穴浓度, 在 80 mA 时能将 DUV-LED 的光功率提升 17 倍. Zhao 等 [17] 设计了阶梯式电子阻挡层来提高 DUV-LED 的性能, 仿真结果表明, 所开发的 EBL 结构改善了界面极化场, 有效缓解了导带和价带弯曲, 提高了辐射复合率, 发射强度提高了 153.8%. 此外, 还有研究人员通过设计 W 形 EBL [18]、倒梯形 EBL [19] 以及优化 EBL 厚度 [15] 来改善载流子注入, 提高内量子效率. 综上所述, 超晶格 EBL (SL-EBL) 结构已经广泛应用于 DUV-LEDs 中, 并在提高发光效率方面取得了不错效果, 但对 SL-EBL 的周期数的优化需要进一步探讨.

本研究制备了具有不同周期数 SL-EBL ( $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}/\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{N}$ ) 的 AlGaIn 基 DUV-LEDs, 研究了 SL-EBL 的周期数变化对 DUV-LEDs 的光输出功率 (light output power, LOP), EQE,  $I$ - $V$  特性以及可靠性的影响. 为了更深入研究器件性能

变化的物理机制, 对能带结构进行了模拟. 此外, 通过 ABC 模型对 EQE 曲线进行拟合和老化后对数坐标  $L$ - $I$  曲线的斜率  $S$  的计算, 探讨了 SL-EBL 周期数变化对 DUV-LEDs 有源区载流子复合机制的影响. 为高效 AlGaIn 基 DUV-LEDs 的 EBL 结构设计提供了参考.

## 2 实验

在蓝宝石衬底上生长 DUV-LEDs 外延片, 依次生长: AlN 缓冲层, 2  $\mu\text{m}$  的 n-AlGaIn 电子注入层 (ESL, Si 掺杂浓度为  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 由 10 nm 的  $\text{Al}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{N}$  量子垒 (Si 掺杂浓度为  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 和 2.5 nm 的  $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$  量子阱组成的 5 个周期的多重量子阱有源区 (MQWs), 3 nm 非掺杂的末垒 (FB), 多周期的  $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{N}$  (2 nm)/ $\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{N}$  (2 nm) 超晶格 EBL (SL-EBL, Mg 掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 55 nm 的 Al 组分梯度渐变 p- $\text{Al}_{0.75 \rightarrow 0.55}\text{Ga}_{0.25 \rightarrow 0.45}\text{N}$  (Mg 掺杂浓度为  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 空穴注入层 (HIL) 以及 10 nm 的 p- $\text{Al}_{0.55 \rightarrow 0.40}\text{Ga}_{0.45 \rightarrow 0.60}\text{N}$  过渡层 (Mg 掺杂浓度为  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ), 最上层为 4 nm 的 p-GaN 欧姆接触层 (Mg 掺杂浓度为  $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ). 为了研究 SL-EBL 的周期数对 AlGaIn 基 DUV-LEDs 光电性能的影响, 设计了 SL-EBL 周期数分别为 5, 6, 7 和 8 的 4 组样品, 分别对应样品 A, B, C 和 D, 如图 1 所示. 所有外延片制备完成后, 采用统一的芯片制造工艺制备成  $500 \mu\text{m} \times$

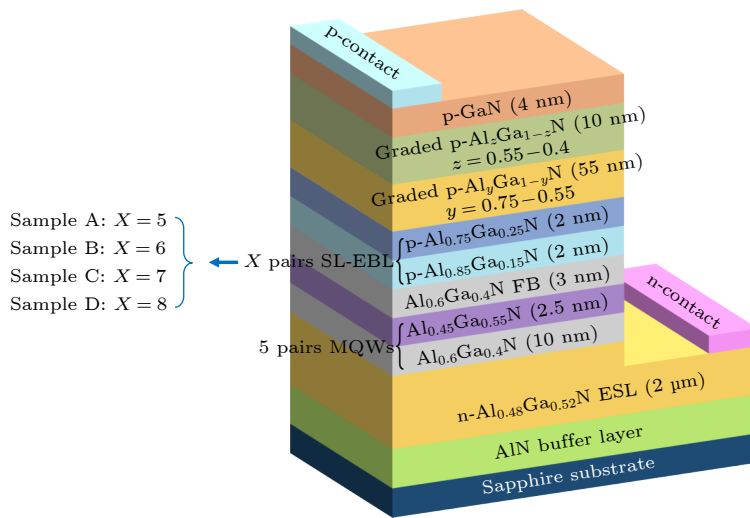


图 1 AlGaIn 基 DUV-LEDs 外延结构示意图 (右) 和四组不同的 SL-EBL 周期数 (左)

Fig. 1. Schematic of epitaxial structure for AlGaIn-based DUV-LEDs (right) and the schematic of four different period numbers of SL-EBL (left).

500  $\mu\text{m}$  的倒装 DUV-LEDs 芯片. 采用透明的导电薄膜 ITO 和 Ni/Au 合金作为 p 型电极, Cr/Al/Ti/Au 合金作为 n 型电极. 在本研究中, 为排除封装工艺对 LED 可靠性的影响, 将切割后的芯片固定在封装支架上, 样品不灌胶、无透镜进行测试. 室温条件下, 利用 Keithley 2450 源表、远方 HAAS-2000 高精度快速光谱辐射计和积分球对 DUV-LEDs 光电性能进行表征. 可靠性测试选择多只 DUV-LEDs 进行裸芯老化, 电流设置为 100 mA (电流密度为  $40 \text{ A/cm}^2$ ). 此外, 为了研究相关的物理机制, 利用计算机辅助设计 (TCAD) 仿真程序对其能带结构进行仿真研究, 仿真所用到的 III-V 族氮化物半导体的参数已经在本课题组发表的文献 [20] 中报道过.

### 3 结果与讨论

图 2(a), (b) 分别给出了 4 种 DUV-LEDs 样品的 LOP, EQE 和 WPE 的实验结果. 由图 2(a) 可知, 4 种样品的 EQE 随测试电流增大的变化趋

势分为两个阶段: EQE 先随测试电流的增加而达到最大值, 即  $E_{\text{max}}$ , 之后随注入电流增大而逐渐减小. 样品 A, B, C 和 D 均在 7.5 mA 时达到  $E_{\text{max}}$ , 分别为 2.8%, 3.4%, 3.5% 和 3.2%, 随着 SL-EBL 周期数的增加呈现先增大后减小的趋势. 图 2(b) 中 WPE 的变化趋势与 EQE 变化趋势一致. 随着 SL-EBL 周期数的增加, 可以有效抑制穿透位错等缺陷, 由这些缺陷主导的陷阱辅助隧穿和非辐射复合降低, 有效阻挡了电子泄漏, 增大了有效辐射复合率 [15]. 但当 SL-EBL 周期数增加, EBL 厚度也随之增大, 空穴势垒厚度增大, 会产生阻碍空穴注入的负面作用, 使有效辐射复合率降低 [19]. 最终在增强电子阻挡能力和阻碍空穴注入两种因素的共同作用下, EQE 随 SL-EBL 周期数的增加表现出上述趋势.

将图 2(c) 中的  $I$ - $V$  曲线分为 3 个区域: (i) 反向偏压区, (ii) 低正向偏压区 ( $0$ — $4.2 \text{ V}$ ), (iii) 开启电压以上的正向偏压区 ( $> 4.2 \text{ V}$ ). 在 (i) 反向偏压区和 (ii) 低正向偏压区, DUV-LEDs 的泄漏电流

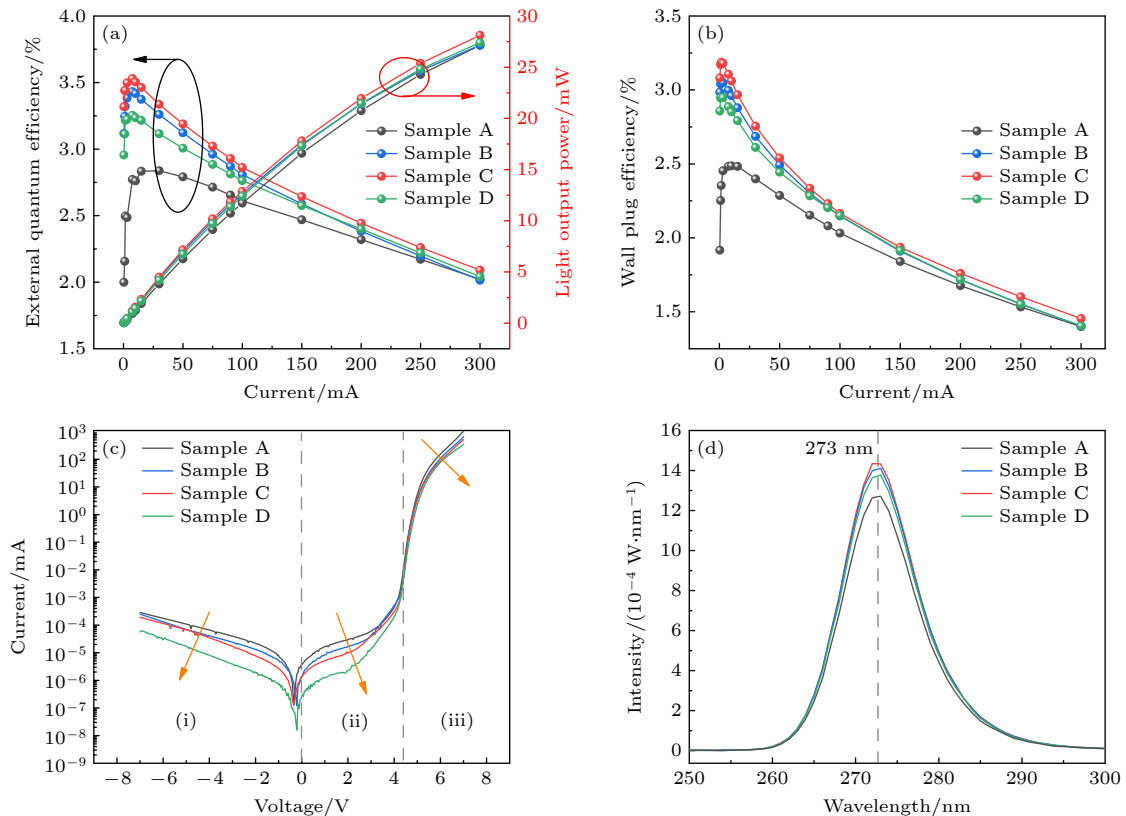


图 2 不同 SL-EBL 周期数样品的实验结果 (a) 光输出功率以及外量子效率随电流的变化; (b) 光电转换效率随电流的变化; (c)  $I$ - $V$  曲线; (d) 在 100 mA 注入电流下发光强度随峰值波长的变化

Fig. 2. Experimental results for different samples: (a) LOP, EQE and (b) WPE as a function of current density; (c) experimentally measured  $I$ - $V$  curves in logarithmic coordinates; (d) EL emission spectrums of DUV-LEDs at 100 mA.

随 SL-EBL 周期数增加而逐渐减小, 周期数为 8 的样品 D 比周期数为 5 的样品 A 在  $-5\text{ V}$  电压下的反向漏电流低一个数量级. 反向漏电流与耗尽区的缺陷态密切相关<sup>[9]</sup>, 由于 AlGaIn 外延层和衬底之间的晶格失配和热失配, 导致 AlGaIn 外延层中产生大量穿透位错等缺陷<sup>[21]</sup>, 这些缺陷会辅助载流子隧穿, 形成跨越有源区的电子泄漏通道<sup>[14]</sup>. 在正向偏压下, 这种泄漏电流的存在是由于有源区内或周围产生的点缺陷对陷阱辅助隧穿和非辐射复合的促进作用<sup>[10]</sup>. 基于正偏压下  $I$ - $V$  曲线从  $10^{-5}$ — $10^{-4}\text{ mA}$  的线性部分来计算理想因子, 样品 A, B, C 和 D 理想因子分别为 63.1, 59.5, 21 和 20.5, 均远大于 2, 这主要是由于上述讨论的深能级缺陷和载流子隧穿泄漏的影响<sup>[22,23]</sup>. 同时可以发现随着 SL-EBL 周期数的增加, 泄漏电流不断减少, 理想因子也随之减小, 其可能原因在于增大超晶格电子阻挡层的厚度可以有效屏蔽位错. 在 (iii) 高于  $4.2\text{ V}$  的正向偏压区的电流也表现出随着 SL-EBL 周期数的增加而降低的现象, 电流的降低主要是由于 SL-EBL 厚度增大导致具有高 Al 组分的高阻层增加, 串联电阻增大. 由图 2(d) 可以发现 4 组样品的电致发光的峰值波长均在  $273\text{ nm}$  左右, 保证了实验测试结果不受波长差异的影响.

为了评估不同 SL-EBL 周期数的 4 种 DUV-LEDs 结构的可靠性, 在室温下对 4 种 DUV-LEDs 的裸芯在恒定电流  $100\text{ mA}$  下进行可靠性实验. 经恒流老化  $500\text{ h}$  后 4 组样品的 EQE 整体变化趋势基本相同, 如图 3(a)—(d) 所示. 从该组 EQE 特性曲线的变化可以看出: 在小电流 ( $1\text{ mA}$ ) 下, 长时间的电流应力导致 DUV-LEDs 的 EQE 显著下降; 对于大电流 ( $100\text{ mA}$ ), 老化后 EQE 的下降明显减小.

从图 3(e), (f) 的归一化光输出功率曲线可以清晰看出, SL-EBL 周期数不同的样品光衰差异较大. 其中, SL-EBL 周期数最大的样品 D 的光输出功率衰减最少, 可靠性最佳, 表明优化 SL-EBL 周期数是提高 LED 器件可靠性的有效方法. 通过增加 SL-EBL 周期数能有效的屏蔽位错, 降低电子泄漏, 提高器件可靠性. 同时, 比较图 3(e), (f) 可以发现, 4 组样品的光输出功率均在小电流下退化的更加明显. 以样品 A 为例, 经过  $500\text{ h}$  的老化后,  $1\text{ mA}$  下光输出功率退化至未老时光输出功率的 5%,  $100\text{ mA}$  下测得光输出功率依然维持在初

始值的 72%. 随着老化的进行, 电流流经有源区的位错缺陷会造成晶格振动产生热量, 导致有源区内缺陷增生, 晶体质量变差<sup>[24]</sup>. 在小电流下, 随着老化的进行, 越来越多的载流子被禁带中的缺陷能级所俘获并通过非辐射复合的方式进行复合, 导致实际参与辐射复合发光的载流子数变少, 使得 4 组样品的发光强度在小电流下显著下降<sup>[25]</sup>. 而在大电流下, 缺陷中心可能会因高注入密度的载流子而饱和, 导致实际参与辐射复合发光的载流子数不会发生明显变化, 无法显著限制 DUV-LEDs 的发光强度<sup>[26]</sup>. 除此之外, 图 3(f) 中插图显示峰值波长均保持在  $273\text{ nm}$ , 未发生变化 (仅示出具有代表性的样品 A 的电致发光光谱, 其他样品老化后的光谱相似, 因此这里没有显示).

如图 2(a) 所示, 未老化前样品 A 的 EQE 与其他样品相差较大, 引起这种现象的一种可能原因是有源区和 EBL 之间的导带偏移较小, 造成电子从有源区向 p 型层泄漏的概率增加. 为了证明我们的猜想并探究影响 DUV-LEDs 性能的物理机制, 对 4 组结构的能带结构进行了模拟计算. 图 4(a)—(d) 分别示出了 4 种不同 EBL 结构在  $75\text{ A/cm}^2$  电流密度下计算得到的能带 (粉色实线) 和准费米能级 (蓝色虚线). 可以观察到, 随着 SL-EBL 周期数 (厚度) 增加, 4 组结构的 EBL 电子势垒高度 ( $\Phi_e$ ) 分别为  $506.5, 527, 534.4, 537.6\text{ meV}$ . 显然, 增加 SL-EBL 周期数能有效地提高 EBL 的电子势垒高度. 与样品 A 相比, 样品 C 和样品 D 的电子势垒高度分别提高了 5.5% 和 6.1%, 这也使样品 C 和样品 D 能更有效地限制电子, 防止电子向 p 型层泄漏. 此外, 随着 SL-EBL 周期数增加, EBL 空穴势垒高度 ( $\Phi_h$ ) 分别为  $313.6, 313.4, 313.3, 313.3\text{ meV}$ , 4 组结构之间的空穴势垒高度无明显变化. 在所设计的 DUV-LEDs 中, SL-EBL 周期数分别从 5 (样品 A) 增大到 7 (样品 C) 时, 空穴势垒高度不变的同时电子势垒高度增大了 5.5%. 因此, 实现了样品 C 的光电性能的显著提高, 如图 2 所示. 此外, 势垒厚度的变化对载流子注入的影响也不容忽视, 增加 SL-EBL 的周期数虽然可以有效地调节 DUV-LEDs 的势垒高度, 但样品 D 的 EBL 厚度由初始的  $20\text{ nm}$  增大到了  $32\text{ nm}$ , 更厚的空穴势垒不利于空穴的带内隧穿, 妨碍了空穴向有源区的注入, 使有源区内的空穴浓度降低, 导致样品 D 的 EQE 下降<sup>[27]</sup>. 有研究表明<sup>[15]</sup>, 在 FB/EBL/HIL 异质结

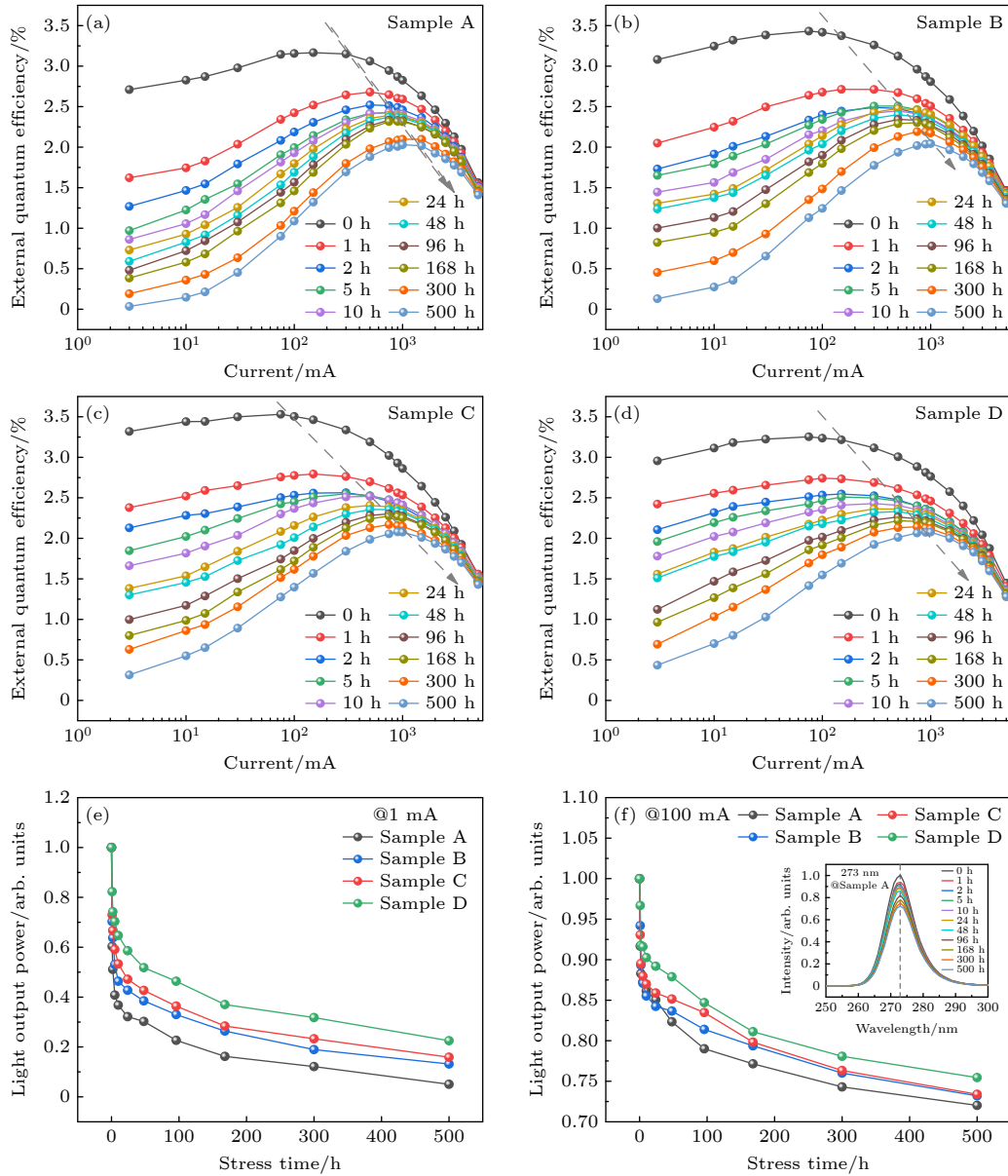


图 3 (a)–(d) 不同老化时间下样品 A, B, C 和 D 的 EQE 随电流的变化; 具有不同 SL-EBL 周期数的样品 A, B, C 和 D 在老化过程中测得的在 (e) 小电流以及 (f) 工作电流下的归一化光输出功率, (f) 中插图为样品 A 在不同老化时间下的归一化电致发光光谱

Fig. 3. The EQE characteristic curves of samples (a) A, (b) B, (c) C, and (d) D after aging; (e) the normalized output power of (e) low injection current and (f) working current of samples A, B, C and D during aging period; the illustration in panel (f) shows the electroluminescence spectra of sample A under different stress time.

中, EBL 的电场会影响空穴注入效率, 随着 EBL 厚度增大, 电场强度降低, 所以空穴注入效率会随着 EBL 厚度增大而下降. 综上所述, 增大 SL-EBL 的周期数会导致电子势垒高度增大, 抑制了电子泄漏; 空穴势垒高度变化可以忽略不计, 对空穴注入的影响很小. 然而, 增加 SL-EBL 的周期数等同于增大了 EBL 厚度, 导致空穴势垒的厚度增大, 阻碍了空穴由 p 型层向有源区注入.

为了研究 SL-EBL 周期数对 DUV-LEDs 的载

流子复合机制的影响, 可以利用载流子复合模型 (ABC 模型) 对测试的 EQE 曲线进行拟合. 在 ABC 模型中包括 5 个变量: SRH 非辐射复合系数 ( $A$ )、辐射复合系数 ( $B$ )、俄歇复合系数 ( $C$ )、有效激活区厚度 ( $d$ ) 以及光提取效率 ( $\gamma$ ). 电流密度方程如下<sup>[28]</sup>:

$$J = qd (An + Bn^2 + Cn^3), \quad (1)$$

其中  $q$  为基本电荷,  $n$  为注入载流子浓度. 由此, IQE 和 EQE 可以表达为

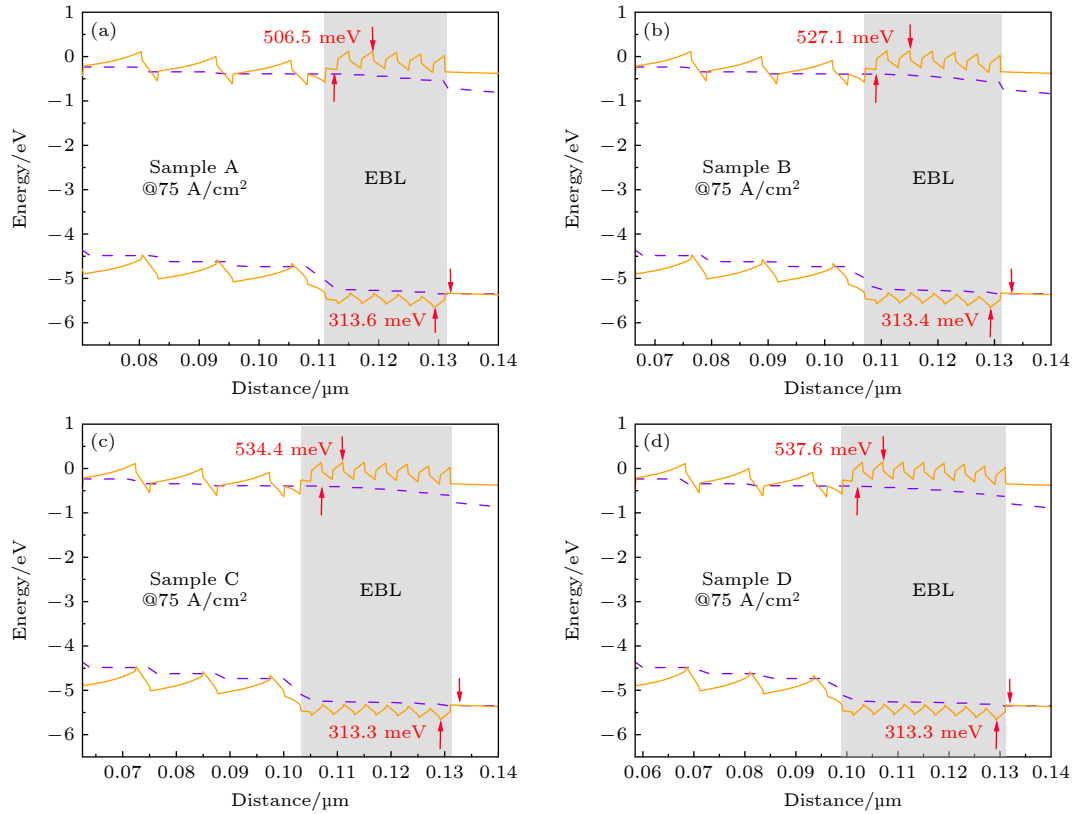


图 4 电流密度为  $75 \text{ A/cm}^2$  时模拟的不同周期数 SL-EBL DUV-LEDs 样品的能带示意图 (a) 样品 A; (b) 样品 B; (c) 样品 C; (d) 样品 D

Fig. 4. Calculated band structure and the Fermi energy level in EBL under current density of  $75 \text{ A/cm}^2$  for sample (a) A, (b) B, (c) C and (d) D.

$$\text{IQE} = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3}, \quad (2)$$

$$\text{EQE} = \gamma \cdot \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3}. \quad (3)$$

在 DUV-LEDs 中, 由于空穴质量远大于电子的质量, 造成了电子和空穴传输的不对称性, 所以电子和空穴的复合主要发生在靠近 EBL 的末阱中. 因此, 在 ABC 模型中设置  $d$  值为  $2.5 \text{ nm}$  与末阱厚度相等. 由于晶格缺陷的存在, DUV-LEDs 器件的 SRH 非辐射复合系数相对较高, 在室温下通常在  $10^6$ — $10^8 \text{ s}^{-1}$  之间<sup>[29]</sup>. 此外, 由于在 4 组样品中除了 SL-EBL 的周期数不同, 其余结构完全一致, 所以在拟合过程中假定  $B$ ,  $C$  和  $\gamma$  相同, 而由于 SL-EBL 厚度对载流子注入效率的影响, 对样品 C 的载流子浓度向下进行微调. 如图 5(a) 所示, 经过对样品 A 和样品 C 的 EQE 曲线进行拟合, 得到 SRH 非辐射复合系数分别为  $3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$  和  $1.8 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ . 随着 SL-EBL 周期数增加, SRH 非辐射复合系数明显降低.

图 5(b) 为样品 A 和样品 C 在老化前后测量

的双对数坐标  $L$ - $I$  曲线, 其中  $L$  为光输出功率. 可以看出, 与具有较低 SRH 非辐射复合系数的样品 C 相比, 样品 A 经过 500 h 的老化后表现出更强烈的光输出功率下降. 为了进一步推断两个样品在老化前后发光过程中主要的载流子复合机制, 根据 Kim 等<sup>[21]</sup> 的研究, 引入参数  $S$ . 在对数坐标中,  $S$  值就是  $L$ - $I$  曲线在一定电流范围内的斜率, 计算公式为

$$S = \frac{\Delta \log(L)}{\Delta \log(I)}. \quad (4)$$

通常在小电流时, 有源层中的非辐射复合过程占主导,  $S = 2$ ; 当电流继续增大, 自由载流子的辐射复合过程或俄歇复合过程占主导时,  $S$  值分别接近于 1 和 0.67<sup>[21]</sup>. 图 5(c) 的散点图示出了样品 A 和样品 C 老化前后的  $S$  值, 老化前用实心方框表示, 老化后用空心方框表示. 在老化之前, 样品 A 和样品 C 的  $S$  值在小电流密度范围内均接近于 1, 表明老化前辐射复合过程占主导地位. 经过 500 h 的老化后, 在小电流范围内对数  $L$ - $I$  曲线的斜率均向 2

移动 (样品 A 和样品 C 分别为 1.7 和 1.4), 表明非辐射复合对于整体复合的占比增大 [21,30]. 晶体初始缺陷引入的非辐射复合中心会在器件退化中发挥作用, 长期老化会使器件有源区域内缺陷增生, 导致非辐射复合增加. 此外, 老化后样品 A 的  $S$  值较样品 C 更接近于 2, 进一步证明老化后样品 A 在小电流下的 SRH 非辐射复合更强. 产生这种现象的主要原因是由于高 Al 组分的 EBL 层生长温度

更高, 在同样的生长速率下, SL-EBL 周期数较多的样品对有源区的热处理时间更长. 对于整个量子阱区域, 尤其是距离最近且主要发生辐射复合发光的末阱和末垒, 可以利用相对较高的温度以及热应力促进位错的湮灭和合并, 减少非辐射复合中心 [31-32].

## 4 结 论

本文研究了 SL-EBL 周期数对发光波长为 273 nm 的 AlGaIn 基 DUV-LEDs 的发光效率、 $I$ - $V$  特性、可靠性以及有源区载流子复合机制的影响. 实验结果表明: 随着 SL-EBL 周期数增加, DUV-LEDs 的 EQE 和 WPE 呈先增大后下降的趋势. 当周期数设计为 7 (厚度为 28 nm) 时, DUV-LEDs 的峰值 EQE 和 WPE 分别为 3.5% 和 3.2%, 对比周期数为 5 的结构提升了 24% 和 28%. 通过  $I$ - $V$  曲线可以发现, 泄漏电流随着 SL-EBL 的周期数增加而减小, 4 组样品的理想因子均远大于 2, 主要原因是由于存在深能级缺陷和载流子隧穿泄漏. 可靠性测试结果表明, SL-EBL 的周期数增加有利于屏蔽位错, 降低电子缺陷辅助隧穿泄漏, 减少缺陷对载流子的捕获, 降低非辐射复合, 提高了 DUV-LEDs 的可靠性. 通过模拟能带结构, 发现 SL-EBL 周期数增加提高了电子势垒高度, 可以起到抑制电子泄漏的作用, 但是空穴势垒厚度的增大会阻碍空穴向有源区注入. 利用 ABC 模型对样品 A 和样品 C 的 EQE 曲线进行了拟合, 得到 SRH 非辐射复合系数分别为  $3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$  和  $1.8 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ , SL-EBL 周期数的增加可显著降低非辐射复合系数, 同时经过 500 h 老化后  $S$  值的增幅更小 (样品 A 和样品 C 分别为 1.7 和 1.4), 最终表现为更低的光功率衰减, 本文为实现高光效高可靠性的 AlGaIn 基 DUV-LEDs 提供了新思路.

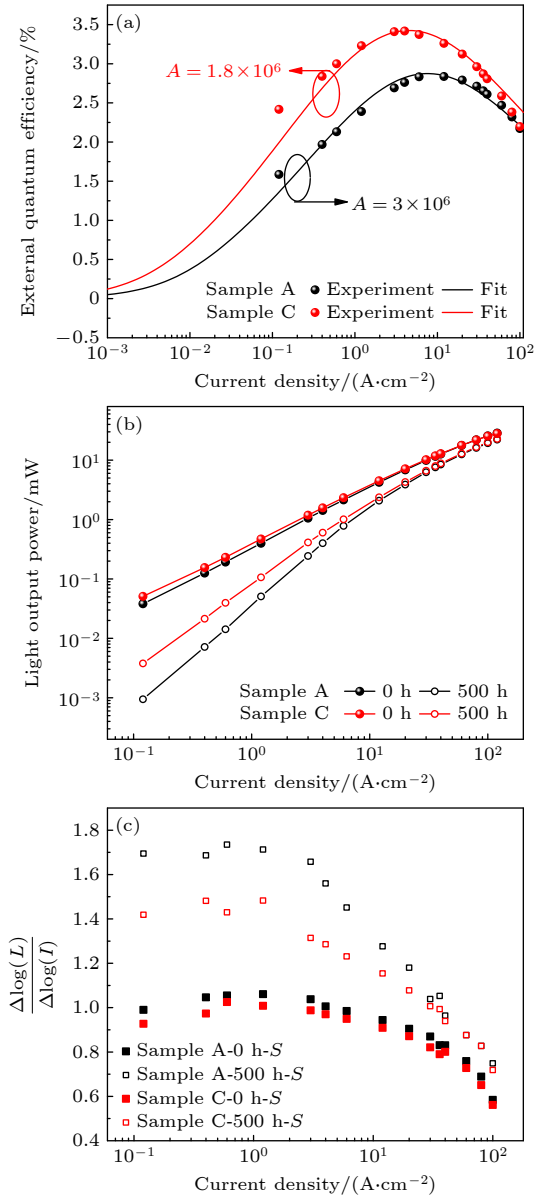


图 5 (a) 样品 A 和样品 C 的 EQE 曲线与 ABC 模型的理论拟合, 其中实验数据用点表示, ABC 模型拟合数据用实线表示; (b) 样品 A 和样品 C 在老化前后双对数坐标  $L$ - $I$  曲线; (c) 样品 A 和样品 C 在老化前后的  $S$  值

Fig. 5. (a) Experimentally measured EQE vs. current density (solid dot) and theoretical ABC model (solid line) fits for sample A and C; (b) LOP and (c) slope ( $S$ ) as functions of current density for sample A and C.

## 参考文献

- [1] Feng L Y, Lu H M, Zhu Y F, Chen Y Y, Yu T J, Wang J P 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 048502 (in Chinese) [冯丽雅, 路慧敏, 朱一帆, 陈毅勇, 于彤军, 王建萍 2023 物理学报 **72** 048502]
- [2] Kneissl M, Seong T Y, Han J, Amano H 2019 *Nat. Photonics* **13** 233
- [3] Du P, Shi L, Liu S, Zhou S J 2022 *Micro Nanostruct.* **163** 107150
- [4] Hu H, Zhou S, Liu X T, Gao Y L, Gui C Q, Liu S 2017 *Sci. Rep.* **7** 44627
- [5] Sharif M N, Niass M I, Liou J J, Wang F, Liu Y 2021 *Superlattice. Microstruct.* **158** 107022

- [6] Nagasawa Y, Hirano A 2018 *Appl. Sci. (Basel)* **8** 1264
- [7] Zhang D Y, Chu C S, Tian K K, Kou J Q, Bi W G, Zhang Y H, Zhang Z H 2020 *AIP Adv.* **10** 065032
- [8] Lobo-Ploch N, Mehnke F, Sulmoni L, Cho H K, Guttmann M, Glaab J, Hilbrich K, Wernicke T, Einfeldt S, Kneissl M 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 111102
- [9] Sun Y H, Xu F J, Xie N, Wang J M, Zhang N, Lang J, Liu B Y, Fang X Z, Wang L B, Ge W K, Kang X N, Qin Z X, Yang X L, Wang X Q, Shen B 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 212102
- [10] Hu H P, Tang B, Wan H, Sun H D, Zhou S J, Dai J N, Chen C Q, Liu S, Guo L J 2020 *Nano Energy* **69** 104427
- [11] Meneghini M, La Grassa M, Vaccari S, Galler B, Zeisel R, Drechsel P, Hahn B, Meneghesso G, Zanoni E 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 113505
- [12] Tian K K, Chu C S, Shao H, Che J M, Kou J Q, Fang M Q, Zhang Y H, Bi W G, Zhang Z H 2018 *Superlattice. Microstruct.* **122** 280
- [13] Sun J, Sun H Q, Yi X Y, Yang X, Liu T Y, Wang X, Zhang X, Fan X C, Zhang Z D, Guo Z Y 2017 *Superlattice. Microstruct.* **107** 49
- [14] Yu H B, Chen Q, Ren Z J, Tian M, Long S B, Dai J N, Chen C Q, Sun H D 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 1
- [15] Cao Y W, Lv Q J, Yang T P, Mi T T, Wang X W, Liu W, Liu J L 2023 *Micro Nanostruct.* **175** 207489
- [16] So B, Kim J, Kwak T, Kim T, Lee J, Choi U, Nam O 2018 *RSC Adv.* **8** 35528
- [17] Zhao F Y, Wei J, Dong H L, Jia Z G, Li T B, Yu C Y, Zhang Z X, Xu B S 2022 *Aip Adv.* **12** 125003
- [18] Wang L Y, He W, Zheng T, Chen Z X, Zheng S W 2019 *Superlattice. Microstruct.* **133** 106188
- [19] Usman M, Jamil T, Malik S, Jamal H 2021 *Optik* **232** 166528
- [20] Cao Y W, Lv Q J, Yang T P, Mi T T, Wang X W, Liu W, Liu J L 2023 *J. Lumin.* **257** 119699
- [21] Kim K S, Han D P, Kim H S, Shim J I 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 091110
- [22] Cao X A, Teetsov J M, D'elyevyn M P, Merfeld D W, Yan C H 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 7
- [23] Wang F X, Ye X C 2017 *Chin. J. Lumin.* **38** 6 (in Chinese) [王福学, 叶焯超 2017 *发光学报* **38** 6]
- [24] Schubert M F, Schubert E F 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 131102
- [25] Lv Q J, Gao J D, Tao X X, Zhang J L, Mo C L, Wang X L, Zheng C D, Liu J L 2020 *J. Lumin.* **222** 117186
- [26] Grillot P N, Krames M R, Zhao H, Teoh S H 2006 *IEEE Trans. Device Mater. Rel.* **6** 564
- [27] Mao Q H, Jiang F Y, Cheng H Y, Zheng C D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8078 (in Chinese) [毛清华, 江凤益, 程海英, 郑畅达 2010 *物理学报* **59** 8078]
- [28] Dai Q, Shan Q F, Wang J, Chhajed S, Cho J, Schubert E F, Crawford M H, Koleske D D, Kim M H, Park Y 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 133507
- [29] Yun J, Shim J I, Hirayama H 2015 *Appl. Phys. Express* **3** 8 022104
- [30] Cao X A, Stokes E B, Sandvik P M, Leboeuf S F, Kretchmer J, Walker D 2002 *IEEE Electr. Device Lett.* **23** 535
- [31] Lv Q J, Liu J L, Mo C L, Zhang J L, Wu X M, Wu Q F, Jiang F Y 2019 *ACS Photonics* **6** 130
- [32] Yamaguchi M, Yamamoto A, Tachikawa M, Itoh Y, Sugo M 1988 *Appl. Phys. Lett.* **53** 2293

# Influence of period number of superlattice electron barrier layer on the performance of AlGaIn-based deep ultraviolet LED\*

Liu Ju<sup>1)</sup> Cao Yi-Wei<sup>1)</sup> Lv Quan-Jiang<sup>1)†</sup> Yang Tian-Peng<sup>2)3)</sup>  
 Mi Ting-Ting<sup>3)</sup> Wang Xiao-Wen<sup>3)</sup> Liu Jun-Lin<sup>1)‡</sup>

1) (*School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

2) (*Epitop Optoelectronic Co., Ltd., Ma'anshan 243000, China*)

3) (*Ma'anshan Jason Semiconductor Co., Ltd., Ma'anshan 243000, China*)

( Received 14 December 2023; revised manuscript received 22 March 2024 )

## Abstract

The development of AlGaIn-based deep ultraviolet light emitting diodes (DUV-LEDs) is currently limited by poor external quantum efficiency (EQE) and wall-plug efficiency (WPE). Internal quantum efficiency (IQE), as an important component of EQE, plays a crucial role in improving the performance of DUV-LEDs. The IQE is related to the carrier injection efficiency and the radiation recombination rate in the active region. In order to improve the IQE of AlGaIn-based DUV-LEDs, this work proposes a scheme to optimize the period number of superlattice electron barrier layer (SL-EBL) to achieve better carrier injection efficiency and confinement capability. The effect of the period number of SL-EBL on the luminous efficiency, reliability and carrier recombination mechanism of AlGaIn-based DUV-LEDs with an emission wavelength of 273 nm are investigated. The experimental results show that the light output power (LOP), external quantum efficiency (EQE) and wall-plug efficiency (WPE) of the DUV-LEDs tend to first increase and then decrease with the period number of SL-EBL increasing, while the leakage current decreases and the reliability is enhanced. The maximum EQE and WPE of the DUV-LED are 3.5% and 3.2%, respectively, at an injection current of 7.5 mA when the period number of SL-EBL is fixed at 7 (the thickness is 28 nm). Meanwhile, the numerical simulation results show that the electron potential barrier height is enhanced with the period number of SL-EBL increasing, and the variation of the hole potential barrier height is negligible. Therefore, increasing the period number of SL-EBL is beneficial to shielding the dislocations and suppressing the leakage of electrons into the p-type layer, which improves the luminous efficiency and reliability of DUV-LEDs. However, when the period number of SL-EBL exceeds 7, the excessively thick hole potential barrier prevents the holes from entering into the activation region and reduces the radiative recombination efficiency. Therefore, EQE and WPE will show an inflection point with the variation of the period number of SL-EBL. In addition, to investigate the carrier recombination mechanism of the active region, the experimental EQE curves are fitted by the ABC model as well as the different slopes in logarithmic light output power-current ( $L-I$ ) curves are calculated after aging. It can be found that increasing the period number of SL-EBL can effectively suppress the non-radiative combination of carriers in the active region. This investigation can provide an alternative way to enhance the photoelectric performance of DUV-LEDs.

**Keywords:** deep ultraviolet light emitting diodes, electron barrier layer, reliability, external quantum efficiency

**PACS:** 85.60.Jb, 73.61.Ey, 78.20.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.73.20231969

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62374076, 62104085) and the Innovation/Entrepreneurship Program of Jiangsu Province, China (Grant No. JSSCTD202146).

† Corresponding author. E-mail: lvquanjiang@ujs.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: liujunlin@ujs.edu.cn

## 超晶格电子阻挡层周期数对AlGa<sub>N</sub>基深紫外发光二极管性能的影响

刘举 曹一伟 吕全江 杨天鹏 米亭亭 王小文 刘军林

### Influence of period number of superlattice electron barrier layer on the performance of AlGa<sub>N</sub>-based deep ultraviolet LED

Liu Ju Cao Yi-Wei Lv Quan-Jiang Yang Tian-Peng Mi Ting-Ting Wang Xiao-Wen Liu Jun-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 128503 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231969

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231969>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

##### AlGa<sub>N</sub>基深紫外LED电子阻挡层的智能优化设计

Intelligent optimization design of electron barrier layer for AlGa<sub>N</sub>-based deep-ultraviolet light-emitting diodes

物理学报. 2023, 72(4): 048502 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222004>

##### 基于BCPO发光材料近紫外有机发光二极管的电致发光效率与稳定性

Electroluminescence efficiency and stability of near ultraviolet organic light-emitting diodes based on BCPO luminous materials

物理学报. 2024, 73(4): 047801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231301>

##### 基于激子阻挡层的高效率绿光钙钛矿电致发光二极管

High efficiency green perovskite light-emitting diodes based on exciton blocking layer

物理学报. 2020, 69(3): 038501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191263>

##### 钙钛矿发光二极管光提取性能增强的研究进展

Research progress of enhancing perovskite light emitting diodes with light extraction

物理学报. 2020, 69(21): 218501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200755>

##### 新型高效率和高稳定性钙钛矿/有机集成太阳能电池光伏性能研究

Photovoltaic performance of novel Perovskite/organic integrated solar cells with high efficiency and high stability

物理学报. 2023, 72(1): 018802 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221120>

##### 利用银纳米立方增强效率的多层溶液加工白光有机发光二极管

Efficiency improvement in solution-processed multilayered phosphorescent white organic light emitting diodes by silica coated silver nanocubes

物理学报. 2020, 69(4): 047801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191526>