

文章编号: 1000-7032(2024)08-1391-07

AlGaIn基深紫外LED光源灭活柯萨奇病毒研究

吴 郁¹, 蓝习瑜², 张梓睿², 吴章鑫¹, 刘忠宇¹, 杨玲佳¹,
张山丽³, 徐 可^{2*}, 贲建伟^{3*}

(1. 北京大学 第三医院, 北京 100191;

2. 武汉大学 生命科学学院, 湖北 武汉 430072;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为探究在高温热处理AlN模板上制备的不同发光波长AlGaIn基LED器件对病毒的灭活效率, 本工作在发光波长257~294 nm范围内制备了7组不同发光波长AlGaIn基深紫外LED器件, 并探究其对柯萨奇病毒灭活效率。实验结果表明, 高温热处理AlN模板可以将AlN模板位错密度降低至 $1.33 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$, 为制备高效率AlGaIn基LED器件奠定了良好基础; 基于高温热处理AlN模板制备的AlGaIn基LED器件, 在灭活距离2 cm、紫外辐照时间30 s实验条件下, 发光中心波长在257~278 nm之间的AlGaIn基LED器件对柯萨奇病毒灭活率 $\geq 99.90\%$, 而发光中心波长为288 nm、294 nm的LED对柯萨奇病毒灭活率仅为99.47%及96.15%。根据以上研究结果, 波长在257~278 nm之间的AlGaIn基LED器件适合在病毒消杀领域应用; 在本工作实验条件下, 波长大于288 nm的AlGaIn基深紫外LED器件对病毒灭活效果较差。

关键词: 高温热处理; AlN模板; AlGaIn; LED; 病毒灭活

中图分类号: O469

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240099

AlGaIn Based Deep Ultraviolet LED for Inactivating Coxsackie Virus

WU Yu¹, LAN Xiyu², ZHANG Zirui², WU Zhangxin¹, LIU Zhongyu¹, YANG Lingjia¹,
ZHANG Shanli³, XU Ke^{2*}, BEN Jianwei^{3*}

(1. Peking University Third Hospital, Beijing 100191, China;

2. College of Life Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding Authors, E-mail: xuke03@whu.edu.cn; benjianwei@ciomp.ac.cn

Abstract: To explore the virus inactivation efficiency of AlGaIn based LED with different light emission wavelengths fabricated on high-temperature annealed (HTA) AlN templates, 7 groups of AlGaIn based LEDs were fabricated with emission wavelengths varied from 257 nm to 294 nm, and the inactivation efficiency for Coxsackie virus was explored. The experimental results show that the threading dislocation density of HTA AlN templates can be decreased to $1.33 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$, which is beneficial for fabricating AlGaIn based LED. The Coxsackie virus inactivation rate is more than 99.90% for the AlGaIn based LED with central emission wavelength between 257 nm and 278 nm under the experimental conditions (inactivation distance of 2 cm, UV irradiation time of 30 s), while the Coxsackie virus inactivation rate only reaches 99.47% and 96.15% for the LED with central emitting wavelength of 288 nm and 294 nm, respectively. According to the above results, AlGaIn based LEDs with emission wavelength between 257 nm and 278 nm are suitable for application in virus sterilization field, while the LED with wavelength longer than 288 nm has poor efficacy in virus sterilization under the experimental conditions.

收稿日期: 2024-04-12; 修订日期: 2024-04-25

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3605000, 2022YFC2704401, 2022YFB3605102, 2018YFB0703704, 2017YFB0405401); 吉林省博士后资助项目

Supported by National Key Research and Development Program of China (2022YFB3605000, 2022YFC2704401, 2022YFB3605102, 2018YFB0703704, 2017YFB0405401); Postdoctoral Funding Project of Jilin Province

Key words: high temperature anneal; AlN template; AlGaIn; LED; virus inactivation

1 引 言

深紫外光源在病毒、细菌消杀领域具有广泛的应用,其基本原理是利用高能量的光子破坏病毒、细菌的遗传物质或蛋白质保护结构,使其失去活性^[1-3]。相比于药剂消杀,紫外光消杀方法具有无视病毒变异、无异味、对人体影响可防控、无残留等优势^[4]。目前,规模化应用的主要紫外消杀光源是峰值发光波长为 254 nm 的汞灯^[5-6]。但是,汞金属对生物以及环境具有严重的危害,对人体的神经、消化和免疫系统以及肺、肾、眼睛等器官都有巨大的毒副作用^[7]。20 世纪 50 年代,日本水俣镇发生一起含汞工业废水排放引起的“水俣病”事件,使世界各国认识到汞污染的严重性^[8]。基于此,128 个国家及地区签署了《关于汞的水俣公约》,要求缔约国自 2020 年起,逐步禁止生产及进出口含汞产品^[9]。然而,人们对于紫外光源病菌消杀的需求却与日俱增。尤其在新冠病毒爆发以来,使人们对于致病病毒、细菌的防范意识大幅提高。因此,开发取代汞灯的新型紫外消杀光源是当前研究的重要方向之一。

AlGaIn 基半导体材料具有 3.4~6.2 eV 之间连续可调直接带隙,响应波段覆盖了 200~365 nm,是制备半导体紫外光源的理想材料^[10-12]。相比于传统的汞灯以及气体灯等紫外光源,其制备的 AlGaIn 基发光器件(LED)具有体积小、易集成、稳定性高、环境友好等优势。然而,受限于 AlGaIn 基材料的同质衬底昂贵、异质外延生长由于大失配导致位错密度高达 $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 量级的问题,低成本、高工作效率的 AlGaIn 基深紫外发光器件制备难以实现,制约了 AlGaIn 基 LED 的规模化应用^[13-15]。而高温热处理方法是近年来提出的可以降低 AlN 模板衬底位错密度的良好方法。其基本原理为利用高温驱动 AlN 材料中位错迁移并湮灭,所制备的 AlN 模板位错密度可降至 10^8 cm^{-2} 量级,为实现低位错密度 AlGaIn 基材料外延生长及高效率器件制备奠定了材料基础^[16-17]。尽管目前已经有多篇发表工作对基于热处理 AlN 模板上制备的 AlGaIn 基深紫外 LED 及其对病菌的灭活效果进行报道,但是相关报道多是基于单波长、或有限几个波长的 AlGaIn 基 LED 进行。如日本丰田

合成株式会社制备了发光波长为 275 nm 的 LED,并探究其对新冠病毒的灭活效果,发现 2.6 mW/cm^2 的辐射照度下,5 s 辐照后新冠病毒灭活率达 99.999%;北京大学研究人员在高温热处理 AlN 模板上制备了 275 nm AlGaIn 基 LED,并探究其对新冠病毒灭活率;长春光机所与武汉大学的研究人员则探究了基于高温热处理 AlN 模板制备发光波长为 256,265,278 nm 的 AlGaIn 基 LED 对新冠病毒、甲流病毒和副流感病毒的灭活效率,发现 0.8 mW/cm^2 辐射照度下,可以在辐照 10 s 内实现大于 99.9% 的病毒灭活效果等等^[18-20]。然而,由于相关研究的波长范围有限,且主要针对于飞沫及气溶胶传播的呼吸道病毒,而针对更适用于表面灭活的经消化道、接触传播相关病菌则尚无系统的基于高温热处理 AlN 模板紫外 LED 灭活报道,使人们对 AlGaIn 基 LED 在病菌灭活方面的应用效果缺少直接的评判依据。

基于以上问题,本工作基于高温热处理 AlN 模板,在发光波长为 257~294 nm 之间制备了 7 个波长的 LED,并探究其对可通过消化道、呼吸道、接触传播的柯萨奇病毒灭活效果。相关成果将为 AlGaIn 基 LED 在病菌消杀领域应用提供部分依据,有利于 AlGaIn 基 LED 深紫外病菌消杀规模化应用。

2 实 验

2.1 样品制备

利用反应磁控溅射系统(iTops-A230),在 c 面蓝宝石异质衬底上沉积厚度约为 200 nm 的 AlN,制备 AlN 模板。溅射参数为溅射功率 3 kW,氮气/氩气/氧气通入比例为 84.5%/15%/0.5%。并在 1700 °C、常压、纯氮气氛围下高温热处理 1 h,得到高温热处理 AlN 模板。在该模板基础上,利用金属有机物化学气相沉积方法(MOCVD,中晟 ProMaxy®UV)外延生长 AlN 外延层及 AlGaIn 基 LED 器件外延结构。AlN、AlGaIn 外延层生长温度/生长压强分别为 1250 °C/4000 Pa、1150 °C/5000 Pa,TMAI、TMGa、NH₃ 分别用作 Al 源、Ga 源以及 N 源,H₂ 为载气。

2.2 样品表征

X 射线衍射(Bruker D8 Discover)摇摆曲线

(XRC)的半高宽(FWHM)用于估算AlN模板总位错密度,扫描电子显微镜(SEM, Hitachi S-4800)表面测试用于详细计数被熔融KOH:NaOH处理后的热处理AlN模板穿透位错密度,截面SEM显微镜结果用于表征AlGaIn基LED器件的外延结构,原子力显微镜(AFM, Bruker Multimode 8)测试样品表面形貌粗糙度,积分球系统(杭州远方光电信息股份有限公司, HAASuiteUV/ATA配ACS及LCS系列光源,光谱辐射计型号为HAAS-2000-UV,波长测量范围为200~400 nm,半峰带宽1 nm,波长准确性 ± 0.1 nm)用以测试灯珠发光光谱及中心发光波长、LED灯珠发光功率,紫外蓝光光谱分析仪(杭州虹谱光色科技有限公司, OHSP-350UVS,测量波长范围为200~450 nm)用于测试特定距离下的灯珠辐射照度。

3 结果与讨论

3.1 高温热处理AlN模板制备

对高温热处理前后的AlN模板的结晶质量进行XRC测试以估算位错密度。高温热处理前后AlN模板的XRC测试结果如图1(a)、(b)所示。高

温热处理前AlN模板(0002)及(10-12)面XRC测试FWHM分别约为340 arcsec及2 614 arcsec,其中高温热处理前AlN模板的XRC曲线强度很弱,主要是由于AlN晶粒相互倾斜、扭转严重,导致AlN材料中的位错密度较高,使X射线衍射方向无法在同一方向集中衍射,导致X射线衍射谱的整体强度弱,但是衍射峰的FWHM较大;而在1 700 °C高温热处理1 h后,AlN模板XRC测试FWHM分别降低至115 arcsec及162 arcsec,证明高温热处理方法可以大幅度提升AlN模板材料质量,降低材料中的位错密度。根据AlN模板的位错密度计算公式^[21]:

$$\rho_s = \beta_{(0002)}^2 / (2\pi \ln 2 \times |b_c|^2), \quad (1)$$

$$\rho_e = \beta_{(10-12)}^2 / (2\pi \ln 2 \times |b_a|^2), \quad (2)$$

其中, ρ_s 为含螺分量的位错密度, ρ_e 为含刃分量的位错密度。 β 为XRC测试FWHM的弧度值, $|b_c|$ 与 $|b_a|$ 数值分别为AlN的c轴与a轴晶格长度。根据公式计算得到前AlN模板的总位错密度约为 $3.82 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$,高温热处理后AlN位错密度约为 $1.74 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$,AlN模板的位错密度得以大幅度降低。

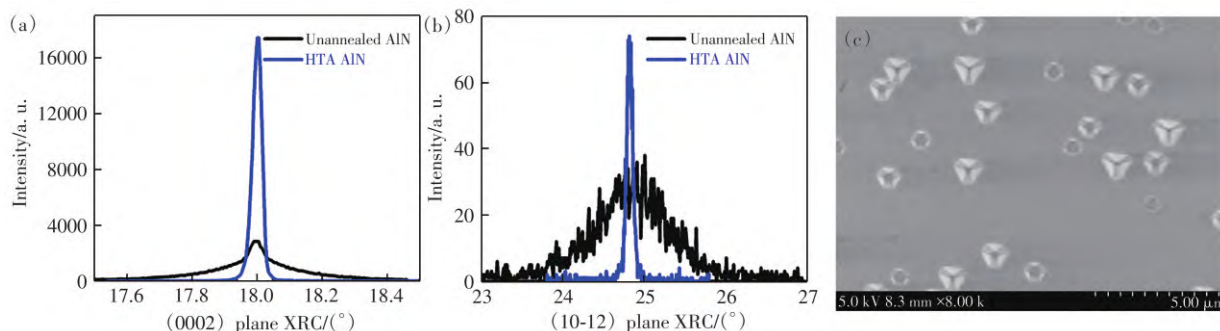


图1 (a)未热处理及高温热处理AlN模板的(0002)面XRC测试结果;(b)未热处理及高温热处理AlN模板的(10-12)面XRC测试结果;(c)熔融KOH/NaOH刻蚀高温热处理AlN模板表面位错刻蚀坑SEM表征结果

Fig.1 (a)The (0002) plane XRC of AlN template W/O HTA. (b)The (10-12) plane XRC of AlN template W/O HTA and AlN template W/O HTA. (c)SEM result of dislocation etching pits on the surface of HTA AlN template using molten KOH/NaOH etching

然而,由于X射线穿透力强,其XRC测试半高宽数据反映AlN模板中所有的位错。但AlN模板对后续AlN、AlGaIn外延层及LED器件外延结构有影响的主要是表面露头位错。为表征AlN模板的表面露头位错密度,本工作利用350 °C的熔融KOH:NaOH(质量分数51%:49%)对高温热处理AlN模板刻蚀5 min。利用AlN模板位错露头处化学性质活泼、较无位错区域会更容易与熔融

的KOH:NaOH反应的特点,使AlN模板在位错露头位置出现刻蚀坑。在SEM系统观测AlN模板表面位错刻蚀坑的数量并计算其对应的视场面积,据此计算高温热处理后AlN模板露头位错密度约为 $23 / (15.73 \mu\text{m} \times 11.03 \mu\text{m}) \approx 1.33 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$,满足AlGaIn基LED器件制备要求。

3.2 AlGaIn基LED器件外延生长及制备

由于在高温热处理过程中会对AlN模板的表

面形貌造成不利影响,本工作在高温热处理 AlN 模板上利用 MOCVD 外延生长 AlN 外延层,以修复高温热处理过程中对 AlN 表面形貌造成的损伤^[22]。在利用 MOCVD 系统外延生长 150 nm AlN 外延层后,AlN 外延层的表面形貌如图 2(a)所示,其表面呈规则的台阶形貌,均方根粗糙度为 0.171 nm;在其上继续外延生长 10 周期 AlGaIn/AlN 超晶格结构后,其表面形貌如图 2(b)所示,均方根粗糙度为 0.135 nm,满足器件外延生长的表面形貌要求。AlGaIn/AlN 超晶格中的 Al-GaIn 层 Al 组分与 n 型 AlGaIn 材料的 Al 组分相一致。

在此基础上外延生长 AlGaIn 基器件结构,其器件结构示意图及截面 SEM 测试结果如图 2(c)及图 2(d)所示。其中有源区量子阱中阱层的 Al 组分根据目标发光波长设定,根据公式 $\lambda = 1240/E_g$ 可确定阱层禁带宽度,其中 λ 为 LED 发光波长, E_g 为量子阱阱层禁带宽度。根据 Vegard's 公式^[23]:

$$E_g = xE_{g-\text{AlN}} + (1-x)E_{g-\text{GaIn}} - 0.341x(1-x), \quad (3)$$

确定阱层 Al 组分。其中 x 为 Al 组分, $E_{g-\text{AlN}}=6.2$ eV 及 $E_{g-\text{GaIn}}=3.4$ eV 分别为 AlN 及 GaIn 的禁带宽度^[24-25]。量子阱中垒层组分较阱层 Al 组分提高至少 10% 以上,以将载流子限制在量子阱阱层中。n 型掺杂区组分与垒层 Al 组分一致;p 型区 Al 组分由垒层 Al 组分渐变降低至 0,以有利于实现极化掺杂,从而实现良好的 p 型欧姆接触电极制备。

在上述基础上,制备了发光中心波长为 257, 265, 269, 274, 278, 288, 294 nm 的 LED 芯片(尺寸

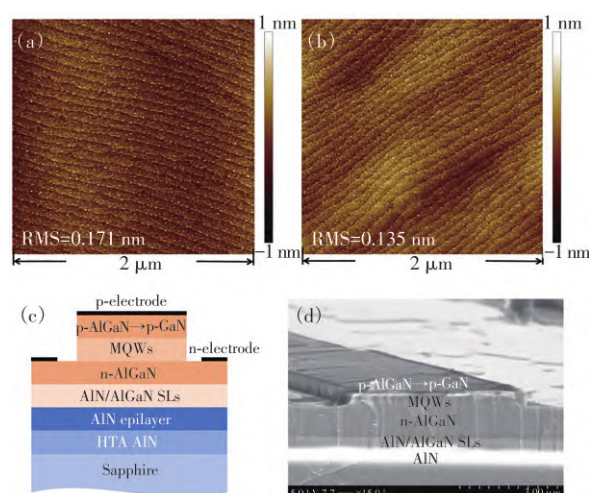


图 2 (a)在高温热处理 AlN 模板上外延生长 150 nm AlN 外延层后的表面 AFM 表征结果;(b)外延生长 AlGaIn/AlN 超晶格结构后 AFM 表面形貌表征结果;(c)LED 器件基本结构示意图;(d)LED 制备工艺探索过程中的 SEM 截面表征结果

Fig.2 The AFM results of 150 nm AlN epitaxial layer grown on HTA AlN template (a) and AlGaIn/AlN superlattice structure (b). (c) Schematic diagram of the basic structure of LED. (d) The corresponding SEM cross-sectional results

400 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$),并对其以无机玻璃为透镜进行半无机封装制备为 3 535 灯珠,其归一化发光光谱如图 3(a)所示,发光光谱对应的半峰宽如表 1 所示。进一步利用积分球系统测试了不同波长灯珠的光输出功率与工作电流密度的关系,如图 3(b)所示。通过光输出功率与工作电流关系曲线,发现在实验参数设置范围内,AlGaIn 基 LED 的光输出功率随工作电流的提高线性升高。

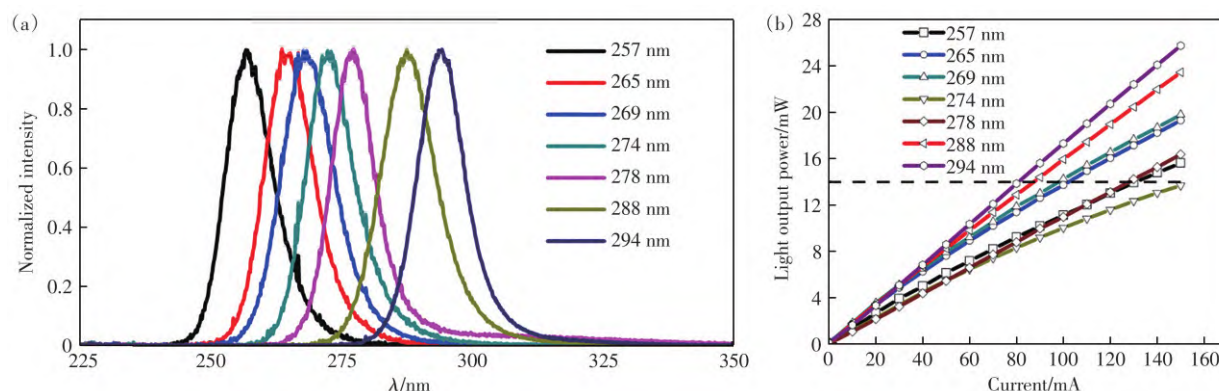


图 3 (a)不同中心发光波长 AlGaIn 基 LED 的 EL 测试发光光谱归一化强度;(b)不同工作电流下 LED 的光输出功率
Fig.3 (a) Normalized EL luminescence spectra of AlGaIn based LEDs with different central emission wavelengths. (b) Light output power of LEDs under different operating currents

表1 2 cm处不同波长LED灯珠的辐射照度

Tab. 1 The irradiation intensity of LED with different wavelengths at 2 cm

发光波长/nm	辐射照度/(mW·cm ⁻²)	半峰宽/nm
257	0.89	10.6
265	0.90	11.1
269	0.93	11.8
274	0.8	10.7
278	0.89	9.7
288	1.10	12.2
294	1.12	10.5

3.3 AlGaIn基LED的柯萨奇病毒灭活研究

为测试不同波长 AlGaIn 基 LED 灯珠对病毒的灭活效果,本研究选取可经呼吸道及消化道传染的手足口病致病源 A16 型柯萨奇病毒进行灭活。在病毒灭活实验条件方面,将使不同波长 AlGaIn 基 LED 器件保持大致相同的光输出功率(约 14 mW),如图 3(b)中的虚线所示。灯珠灭活距离选取便携式消杀设备适用的 2 cm,对柯萨奇病毒辐照 30 s 进行灭活研究。不同波长的 AlGaIn 基 LED 在 2 cm 处的辐射照度如表 1 所示。

病毒灭活实验在温度 25 °C、湿度 50%±10% 条件下进行。病菌灭活测试采用半数组织培养感染剂量(TCID₅₀)滴定方法,将 60 μL 浓度为 10⁶ TCID₅₀/mL 左右的柯萨奇病毒(CVA-16,来源于 CCTCC GDV226)滴于载玻片上,使用 7 种不同波长的 LED 于 2 cm 照射病毒 30 s。照射结束后将病毒以 10 倍梯度稀释进行半数组织培养感染剂量滴定实验。弃掉单层 Vero E6 细胞的原培养液,将不同梯度的病毒加入 96 孔板中,每孔 100 μL。设置未照射的病毒组为阴性对照组。置于 37 °C、5%CO₂ 培养箱 72 h 或 120 h 后,在显微镜下观察细胞病变情况,与阴性对照组进行对照,计算病毒灭活效率。

不同中心发光波长的 AlGaIn 基 LED 在 2 cm 处对柯萨奇病毒灭活 30 s 后的灭活率如图 4 所示。其中柱状图高度表示活病毒的滴度,对应数字表示经过计算后病毒的灭活率。

在病毒有效灭活标准选取方面,根据国家相关标准对利用载体法进行病毒灭活实验的灭活率要求主要为“灭杀对数值≥3”,设定判定病毒有效灭活的标准为灭活率≥99.9%,与公开发表文献中认定病毒灭活有效标准也相一致^[26-28]。根据 AlGaIn 基 LED 灯珠灭活结果可知,在实验条件下,发光中心波长为 257, 265, 269, 274, 278 nm 的 Al-

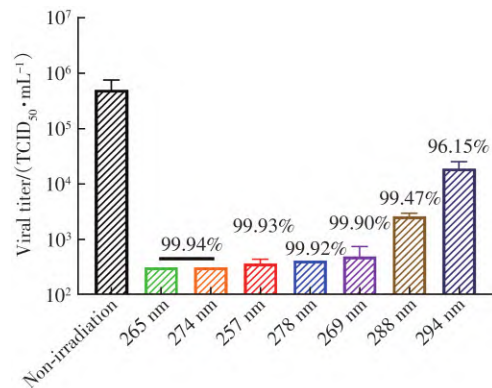


图4 不同波长 AlGaIn 基 LED 在本工作实验条件下的柯萨奇病毒灭活率

Fig.4 The Cocksackie virus inactivation rate of AlGaIn based LEDs with different wavelengths under the experimental conditions

GaN LED 灯珠都可以实现病菌灭活率≥99.9%,分别达到 99.93%、99.94%、99.90%、99.94%、99.92%;而 288 nm 及 294 nm 紫外灯珠的辐射照度分别为 1.10 mW/cm²与 1.12 mW/cm²,远高于其他波长的 LED 灯珠辐射照度((0.86±0.07) mW/cm²),然而其对应的病毒灭活率<99.9%,分别为 99.47%、96.15%。因此,在实验条件下,可以认定发光波长在 255~280 nm 之间的 AlGaIn 基 LED 都具有良好的病菌灭活效果,而中心发光波长为 288 nm 及 294 nm 的灯珠病毒灭活效果较差。

4 结 论

本工作在高温热处理 AlN 模板上制备了 7 个不同中心发光波长的 LED 器件,并对柯萨奇病毒灭活效果进行测试。在实验条件下,发光中心波长为 257, 265, 269, 274, 278 nm 的 AlGaIn 基 LED 灯珠对柯萨奇病毒灭活效率都>99.9%,分别达到 99.93%、99.94%、99.90%、99.94%、99.92%;发光中心波长为 288 nm 及 294 nm 的 LED 灯珠病毒灭活率则分别为 99.47%、96.15%。根据以上实验结果,可以认定,在实验条件下,可用于高效病毒灭活的 AlGaIn 基 LED 的发光中心波长在 257~278 nm 之间;而更短波长的 AlGaIn 基 LED 是否适用于病毒灭活,则需要未来工作进一步探索。本工作成果可为 AlGaIn 基 LED 器件用于病毒消杀领域提供实验依据。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240099.

参 考 文 献:

- [1] CUTLER T D, ZIMMERMAN J J. Ultraviolet irradiation and the mechanisms underlying its inactivation of infectious agents [J]. *Animal Health Research Reviews*, 2011, 12(1): 15-23.
- [2] GÓMEZ-LÓPEZ V M, JUBINVILLE E, RODRÍGUEZ-LÓPEZ M I, *et al.* Inactivation of foodborne viruses by UV light: a review [J]. *Foods*, 2021, 10(12): 3141.
- [3] LOVEDAY E K, HAIN K S, KOCHETKOVA I, *et al.* Effect of inactivation methods on SARS-CoV-2 virion protein and structure [J]. *Viruses*, 2021, 13(4): 562.
- [4] HEBLING M, HÖNES K, VATTER P, *et al.* Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation: review and analysis of coronavirus photoinactivation studies [J]. *GMS Hyg. Infect. Control*, 2020, 15: Doc08.
- [5] KIM Y J, LEE J I, KANG D H. Inactivation of foodborne pathogenic bacteria in water and stainless steel surfaces by vacuum-UV amalgam lamp and low-pressure mercury UV lamp irradiation [J]. *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, 2023, 84: 103297.
- [6] WOOD J P, ARCHER J, CALFEE M W, *et al.* Inactivation of *Bacillus anthracis* and *Bacillus atrophaeus* spores on different surfaces with ultraviolet light produced with a low-pressure mercury vapor lamp or light emitting diodes [J]. *J. Appl. Microbiol.*, 2021, 131(5): 2257-2269.
- [7] HA E, BASU N, BOSE-O'REILLY S, *et al.* Current progress on understanding the impact of mercury on human health [J]. *Environ. Res.*, 2017, 152: 419-433.
- [8] MURATA K, KARITA K. Minamata disease [M]. NAKAJIMA T, NAKAMURA K, NOHARA K, *et al.* *Overcoming Environmental Risks to Achieve Sustainable Development Goals*, Singapore: Springer, 2022: 9-19.
- [9] COULTER M A. Minamata convention on mercury [J]. *International Legal Materials*, 2016, 55(3): 582-616.
- [10] 王雪, 刘乃鑫, 王兵, 等. AlGaIn 基深紫外 LED 的 NiAu 透明电极及其接触特性 [J]. *发光学报*, 2023, 44(5): 898-903.
- WANG X, LIU N X, WANG B, *et al.* Ohmic contact characteristics of AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes with NiAu transparent electrode [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(5): 898-903. (in Chinese)
- [11] JIANG K, SUN X J, SHI Z M, *et al.* Quantum engineering of non-equilibrium efficient p-doping in ultra-wide band-gap nitrides [J]. *Light Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 69.
- [12] 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]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(11): 1974-1980. (in Chinese)
- [13] HE C G, WU H L, JIA C Y, *et al.* Low-defect-density aluminum nitride (AlN) thin films realized by zigzag macrostep-induced dislocation redirection [J]. *Cryst. Growth Des.*, 2021, 21(6): 3394-3400.
- [14] LI Y, ZHANG C, LUO X G, *et al.* Surface, structural and optical properties of AlN thin films grown on different face sapphire substrates by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2018, 458: 972-977.
- [15] KNAUER A, MOGILATENKO A, HAGEDORN S, *et al.* Correlation of sapphire off-cut and reduction of defect density in MOVPE grown AlN [J]. *Phys. Status Solidi (B)*, 2016, 253(5): 809-813.
- [16] BEN J W, SHI Z M, ZANG H, *et al.* The formation mechanism of voids in physical vapor deposited AlN epilayer during high temperature annealing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, 116(25): 251601.
- [17] MIYAKE H, LIN C H, TOKORO K, *et al.* Preparation of high-quality AlN on sapphire by high-temperature face-to-face annealing [J]. *J. Cryst. Growth*, 2016, 456: 155-159.
- [18] SAITO Y, WADA S, NAGATA K, *et al.* Efficiency improvement of AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes and their virus inactivation application [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2021, 60(8): 080501.
- [19] LIU S F, LUO W, LI D, *et al.* Sec-eliminating the SARS-CoV-2 by AlGaIn based high power deep ultraviolet light source [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(7): 2008452.
- [20] JIANG K, LIANG S M, SUN X J, *et al.* Rapid inactivation of human respiratory RNA viruses by deep ultraviolet irradiation from light-emitting diodes on a high-temperature-annealed AlN/Sapphire template [J]. *Opto-Electron. Adv.*, 2023, 6(9): 230004.

- [21] BEN J W, SUN X J, JIA Y P, *et al.* Defect evolution in AlN templates on PVD-AlN/sapphire substrates by thermal annealing [J]. *CrystEngComm*, 2018, 20(32): 4623-4629.
- [22] 聂子凯, 贲建伟, 张恩韬, 等. 阶聚束 AlN 高温热退火形貌演化研究 [J]. *人工晶体学报*, 2023, 52(6): 1016-1024.
- NIE Z K, BEN J W, ZHANG E T, *et al.* Evolution of AlN step bunching morphology during high-temperature annealing [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2023, 52(6): 1016-1024. (in Chinese)
- [23] LIOU B T, YEN S H, KUO Y K. Vegard's law deviation in band gaps and bowing parameters of the wurtzite III-nitride ternary alloys [C]. *Proceedings of the SPIE 5628, Semiconductor Lasers and Applications II, SPIE*, 2005: 296-305.
- [24] 武红磊, 郑瑞生, 李萌萌, 等. 碳硅共掺杂 p 型 AlN 的光电性能研究 [J]. *发光学报*, 2013, 34(9): 1199-1202.
- WU H L, ZHENG R S, LI M M, *et al.* Photoelectrical performance of p-type AlN crystal codoped by Si and C [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(9): 1199-1202. (in Chinese)
- [25] KIM S H, JO C H, BAE M S, *et al.* Low temperature processed CO₂ laser-assisted RF-sputtered GaN thin film for wide bandgap semiconductors [J]. *J. Asian Ceram. Soc.*, 2023, 11(1): 68-79.
- [26] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 38504-2020 喷雾消毒效果评价方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 38504-2020 *Evaluation Method of Disinfection Effect of Spray Disinfection* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [27] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB 28235-2020 紫外线消毒器卫生要求 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 28235-2020 *Hygienic Requirements for Ultraviolet Appliance of Disinfection* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [28] 吕凡, 郝丽萍, 章骅, 等. 病毒在环境卫生作业环境中的存活潜力及感染风险防控探讨 [J]. *环境卫生工程*, 2020, 28(1): 1-9.
- LV F, HAO L P, ZHANG H, *et al.* Survival potential of viruses during environmental sanitation operation and the prevention and control of the infection risk [J]. *Environ. Sanit. Eng.*, 2020, 28(1): 1-9. (in Chinese)



吴郁(1971-),女,湖南邵阳人,博士,副主任医师,2006年于中国协和医科大学北京协和医院/学院获得博士学位,主要从事妇产科、妇科肿瘤及微创技术及妇科肿瘤研究。
E-mail: pheonix1997@163.com



贲建伟(1992-),男,吉林大安人,博士,特别研究助理,2019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,主要从事宽禁带氮化物材料及器件的研究。
E-mail: benjianwei@ciomp.ac.cn



徐可(1982-),女,吉林省吉林市,博士,教授,2009年于中国科学院上海生命科学研究院获得博士学位,主要从事流感病毒、冠状病毒等呼吸道病毒致病机制等方面的研究。
E-mail: xuke03@whu.edu.cn