

文章编号: 1000-7032(2023)10-1849-13

## 紫外光通信用日盲型LED研究进展

郭春辉<sup>1</sup>, 孙雪娇<sup>2</sup>, 郭 凯<sup>3</sup>, 张晓娜<sup>3</sup>, 王 兵<sup>2,3</sup>, 魏同波<sup>2</sup>,  
王 申<sup>1</sup>, 苏晋荣<sup>1</sup>, 闫建昌<sup>2,3</sup>, 刘乃鑫<sup>2,3\*</sup>

(1. 山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030000;  
2. 中国科学院半导体研究所 半导体照明研发中心, 北京 100083;  
3. 山西中科璐安紫外光电科技有限公司, 山西 长治 046000)

**摘要:** 紫外光通信在激光雷达、战术通信、航空航天内部安全通讯和片上集成通信等领域有着重要应用前景。传统的紫外光通信LED光源的调制带宽窄、输出光功率低和制造工艺复杂等缺点限制了它在长距离、高速率通信和片上集成通信领域的广泛应用。实验表明,增加单个器件发光面积可提升光输出功率,但增加的器件电容对带宽提升是不利的,因此紫外光通信LED未来的重要研究方向是提升并优化带宽的同时增加器件的光功率密度。UVC Micro-LED器件有着光提取效率高、时间常数小、载流子寿命短、调制速率快及工作电流密度高等出色性能,因此在通讯领域受到科研界和工业界的广泛青睐。本文总结了紫外LED、特别是UVC Micro-LED的相关研究进展,并重点介绍了它们在光通信及其片上集成互联方面的应用。研究发现,对UVC Micro-LED及其阵列制备与性能提升加强研究,是未来提升自由空间和片上互联紫外通信系统性能的最佳解决方案之一。

**关键词:** 紫外光通信; 微尺寸发光二极管; 调制速率; 片内集成光通信; 光提取效率  
**中图分类号:** TN312.8 **文献标识码:** A **DOI:** 10.37188/CJL.20230099

## Recent Progress of Solar Blind Light Emitting Diodes for Ultraviolet Optical Wireless Communication Use

GUO Chunhui<sup>1</sup>, SUN Xuejiao<sup>2</sup>, GUO Kai<sup>3</sup>, ZHANG Xiaona<sup>3</sup>, WANG Bing<sup>2,3</sup>,  
WEI Tongbo<sup>2</sup>, WANG Shen<sup>1</sup>, SU Jinrong<sup>1</sup>, YAN Jianchang<sup>2,3</sup>, LIU Naixin<sup>2,3\*</sup>

(1. College of Physics And Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030000, China;  
2. Research and Development Center for Semiconductor Lighting Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;  
3. Shanxi Zhongke Lu'an Ultraviolet Optoelectronics Technology Co., Ltd., Changzhi 046000, China)  
\* Corresponding Author, E-mail: nxliu@semi.ac.cn

**Abstract:** Ultraviolet communication has extensive applications in laser radar, tactical communication, internal security communication in aerospace plane and on-chip integrated optical communication. Both of the bandwidth and light output power of the traditional deep ultraviolet communication LED were low, and the manufacturing process was complex, which limited their widespread application in long-distance, high-speed communication, and on-chip integrated optical communication fields. Experiments have shown that the increasing of the light emitting area of single device can improve the light output power, but the device capacitance has a negative effect on the bandwidth. Therefore, an important research direction for ultraviolet communication LEDs in the future is to improve the bandwidth and the optical power density of the devices simultaneously. UVC Micro-LEDs with higher light extraction efficiency, lower time constant, shorter carrier lifetime, faster modulated rate and higher current density than traditional

收稿日期: 2023-04-17; 修订日期: 2023-05-06

基金项目: 2021年度山西省重点研发项目(202102030201007); 国家重点研发计划(2022YFB3604804)

Supported by 2021 Key R&D Projects in Shanxi Province(202102030201007); National Key Research and Development Program of China(2022YFB3604804)

LED have been widely favored by the scientific and industrial communities. This paper summarizes the UV LED, especially UVC Micro-LEDs related research progress, and their applications in optical communication and integration on a chip interconnection. It is found that deepening study on the preparation and performance improvement of UVC Micro-LEDs and their arrays will be one of the best solutions for improving the performance of free space and on-chip integrated ultraviolet communication systems in the future.

**Key words:** ultraviolet optical wireless communication; Micro-LEDs; modulated rate; on-chip integrated optical communication; light extraction efficiency

## 1 引 言

紫外光无线通信(Ultraviolet optical wireless communication, UVOWC)通常是指用波长为 200 ~ 280 nm 范围的“日盲区”UVC(Ultraviolet-C)波段,利用大气当中的分子、气溶胶等微粒的散射作用进行无线通信的技术。它利用 UVC 波段在大气中背景噪声低的性质,具有防窃听、抗干扰、非视距(Non-line-of-sight, NLOS)等优点,特别适合应用于卫星、战术等通信场景<sup>[1]</sup>。自由空间紫外光通信的相关研究集中在发送光源和接收探测器的制备、光信号的调制编码、对信道环境的建模分析、分集接收技术及多跳通信网络等性能提升方法领域<sup>[2]</sup>,但由于日盲区紫外光的信道环境复杂、光源性能较差及光子吸收和散射严重等原因,如

何实现长距离紫外通信成为目前亟需解决的难题之一。

紫外光源是紫外光通信技术发展的关键。传统的紫外光源包括氙闪光灯、低压汞灯、紫外激光器等,这些光源大多笨重、效率低、带宽窄,不适合作为通信光源<sup>[3-5]</sup>。而半导体 UVC 发光二极管(Light emitting diode, LED)体积小、成本低、带宽高,它极大地推动了紫外通信技术的发展。自 2000 年以来,美国、中国、日本、欧洲等国家和地区在紫外通讯方面投入了大量科研人力物力<sup>[2,6-8]</sup>。

典型的倒装 UVC LED 异质外延结构是使用金属有机化学气相淀积技术在蓝宝石衬底上依次生长 AlN 缓冲层、AlGaIn 超晶格层、N 型 AlGaIn 层、有源区、电子阻挡层、P-AlGaIn 层和 P-GaN 层。有源区包括几个周期极薄的低 Al 组分 AlGaIn 量子

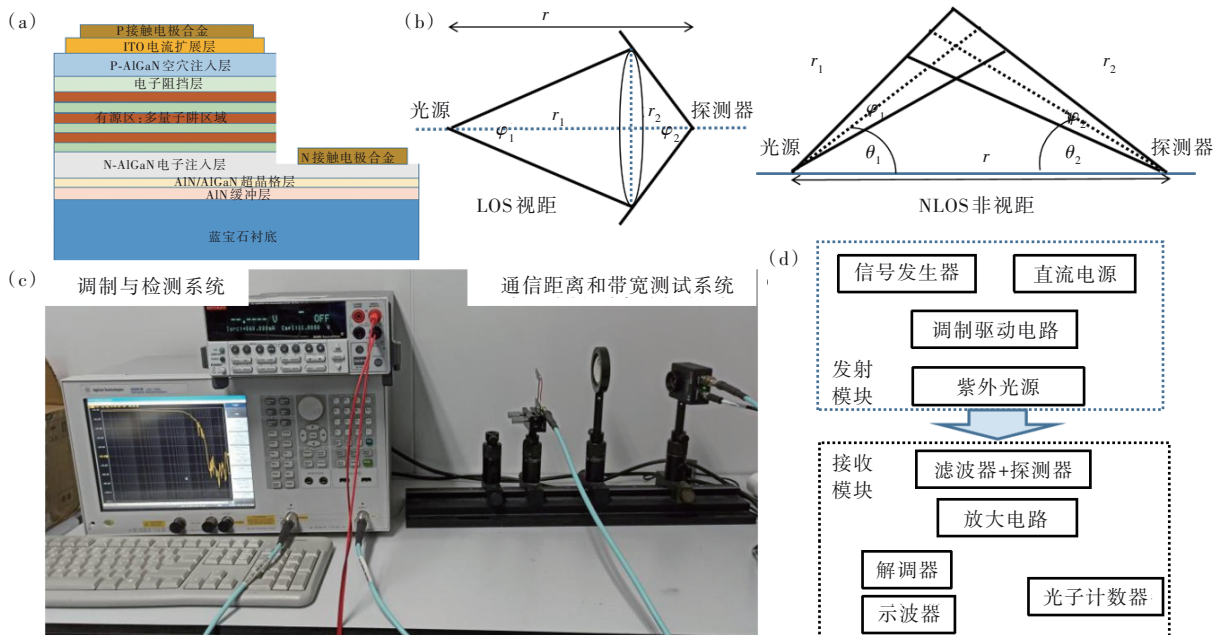


图 1 用于紫外光通信的传统 LED 的典型结构(a)、典型 UVC 通信配置类型(b)、测量通信性能的实验装置(c)、通信系统的组成模型(d)。

Fig. 1 (a) Typical structure of a conventional LED for UV communication. (b) Typical configurations for UVC communication. (c) Experimental setup for measuring communication performance and the UVC LED. (d) Communication system model.

阱,其通过高 Al 组分的 AlGaIn 量子垒分离,通过调整 Al 组分可使发射波长在 200~365 nm 连续调节。

传统倒装 UVC LED 的工艺复杂,通常有:清洗,台面(Mesa)的光刻与刻蚀,N 与 P 接触电极区域的光刻与刻蚀,N 和 P 欧姆接触金属的蒸镀、剥离和退火,覆盖(Cover)金属的蒸镀与剥离,钝化层沉积、光刻与刻蚀,PAD 电极的光刻、刻蚀、蒸镀与剥离等。还需要进行测试,如传输线模型测试、芯片上测试(Chip on wafer, COW)、目检等。

本文简要介绍了紫外光通信光源发展及 LED 制备的基本工艺;回顾了传统的大尺寸 LED 光源在紫外光通信系统中的使用及其在使用过程中出现的难题;重点介绍了 UVC Micro-LED 的关键技术研究,包括相对传统 LED 的性能提升、Micro-LED 特性的物理机制及其在紫外光通信中的应用;最后对紫外 Micro-LED 在片上光互联及自由空间通信方面的研究和应用进行了介绍。紫外光互联相比可见光或传统的导线互联有很大优势,不仅可用作片上通信,还可以用多功能系统形式进行自由空间光通信。图 1 是典型的紫外 LED 结

构及其通信系统模型与测试平台。

## 2 紫外光通信用传统 LED

紫外光源的输出光功率和带宽是限制通信系统性能的重要参数。光源的输出光功率(Light output power, LOP)基本决定了通信距离并且与外量子效率(External quantum efficiency, EQE)直接相关。外量子效率是指注入器件的电荷载流子转换为 LED 发射的 UVC 光子的百分比,可以通过内量子效率乘以光提取效率来计算<sup>[9]</sup>。常规 UVC LED 的 EQE 在 1%~3% 范围内,发光强度在毫瓦级。在光通信中,光源的带宽决定了光通信的信道容量。LED 的带宽主要由 RC 时间常数<sup>[10]</sup>和载流子寿命决定,与尺寸有较强关联性<sup>[11]</sup>。

较差光提取效率(Light extraction efficiency, LEE)是 UVC LED 的 EQE 较低的主要因素之一<sup>[12]</sup>。文献报道中可以提升 LEE 的方法有很多,比如采用高反射光子晶体<sup>[13]</sup>、反射电极<sup>[14]</sup>、制备网状 P-GaN/氧化铟锡电流扩展层以及用纳米多孔模板作为外延材料<sup>[15]</sup>等。传统 LED 进行光通信的相关研究总结见表 1。

表 1 紫外光通信用传统 LED 的性能

Tab. 1 Performance of conventional LEDs for UVOWC

年份	波长/nm	功率/mW	带宽/MHz	调制	误码率	速率/kbps	视距	距离/m	文献
2006	274	4.5(10 颗)		4-PPM	—	2.4	NLOS	11	[16]
2009	270	50 kW(阵列)		—	$10^{-4}$	100		11.46(水下)	[17]
2010	商用	7(单颗)		PPM	<0.01%	115.2		10	[18]
2011	270	0.32(单颗)		OOK	$7.0469 \times 10^{-4}$	115.2		4.5	[19]
2012		43(36 颗)	—	OOK	$10^{-4}$	2.4	LOS DLOS	—	[20]
2014	265	1~10		OOK	$10^{-3}$	500	LOS DLOS	27.5 11(30°)	[21]
2015		30		—	<0.01	—	NLOS	24	[22]
		20(36 颗)		4-PPM	$10^{-5}$	115.2	DLOS	30	[23]
2014	275	0.58(单颗)		4-PPM	—	—	LOS	4	[24]
2017	294	190 $\mu$ W(7 V)	29	OFDM	$2.8 \times 10^{-4}$ $2.4 \times 10^{-4}$	71(Mbps)	LOS DLOS	—	[25]
2018	280	3~5(mW/cm <sup>2</sup> 亮度)	153	4-PPM		2.08(Gbps)	LOS	1.5	[26]
2020	278	—	—	概率整形 DMT	—	2.4(Gbps)	LOS DLOS	1 5	[27]
						1.09(Gbps)	DLOS	—	[28]

2020 年,OOI 团队使用商用 278 nm UVC LED,采用概率整形 DMT(Probabilistically shaped discrete multitone, DMT)调制方法分别在 1 m 和 5 m 的距离下验证了 LOS 视距通信,速率分别为

2.4 Gbps 和 2.0 Gbps,是目前文献中商用紫外 LED 的最高通信速率。该团队还采用分集接收技术,在 1×2 SIMO 散射 LOS 链路上( $\pm 9^\circ$ )上传输速率均大于 0.26 Gbps( $0^\circ$ 时为 1.09 Gbps)。验证了

单输入多输出系统稳定性优于单输入单输出系统,同时该系统也可以减轻有雾天气引起的信道衰落现象<sup>[28]</sup>。然而,受限于LED性能,通信能力进一步提升存在困难。

针对传统紫外LED的LEE小、带宽小、光功率较低和电流拥挤等不利于光通信应用的特点,根据Yu等的仿真研究可以发现采用较小的Mesa尺寸可以改善侧壁发光<sup>[29]</sup>和电流扩展性,相比大面积LED,小尺寸LED的效率有显著提升。因此有必要进一步研究这种提升机制,更多的科研人员开始着眼于Micro-LED的工艺制备及性能改善的相关研究。

### 3 紫外光通信用Micro-LED

Micro-LED或 $\mu$ LED是指芯片发射区Mesa尺寸在1~100  $\mu\text{m}$ 的LED器件,它的轴向层应变小、光提取较高、电流分布均匀、散热快、载流子寿命短和RC时间常数小,在实现高亮度的同时还可以实现高带宽<sup>[30]</sup>。用这种工艺制作的可见光<sup>[31]</sup>和紫外光通信光源近年多有报道。

#### 3.1 紫外Micro-LED研究进展

目前,关于紫外Micro-LED的研究主要有两个方面。首先,探究小尺寸Mesa的Micro-LED效率改善现象的尺寸依赖性的物理机制和理论基础,比如热阻效率、减弱载流子局域化等。其次,探索高效率Micro-LED及阵列的物理机制,比如波长红移现象、大注入下亮度降低等。

2019年,格拉斯哥大学顾而丹团队制作了像素面积为566  $\mu\text{m}^2$ 的主发射波长为262 nm的紫外通信用Micro-LED阵列,并且研究了单个Micro-LED像素的电-光特性,图2是该研究中涉及到的器件结构、工艺、电光特性曲线和通信参数。该研究发现,首先,单个Micro-LED像素的工作电压在注入1 mA电流时为13 V,电压较高的原因是欧姆接触的电阻率较高。其次,LED由于大注入电流下的载流子局域化和产生的热量使内量子效率降低,是导致大电流密度下出现亮度随着注入电流的增加而减小的现象的一个原因,单个Micro-LED像素在3 400  $\text{A}/\text{cm}^2$ 的注入电流密度下实现的最大亮度为35  $\text{W}/\text{cm}^2$ 。在电光调制性能方面,

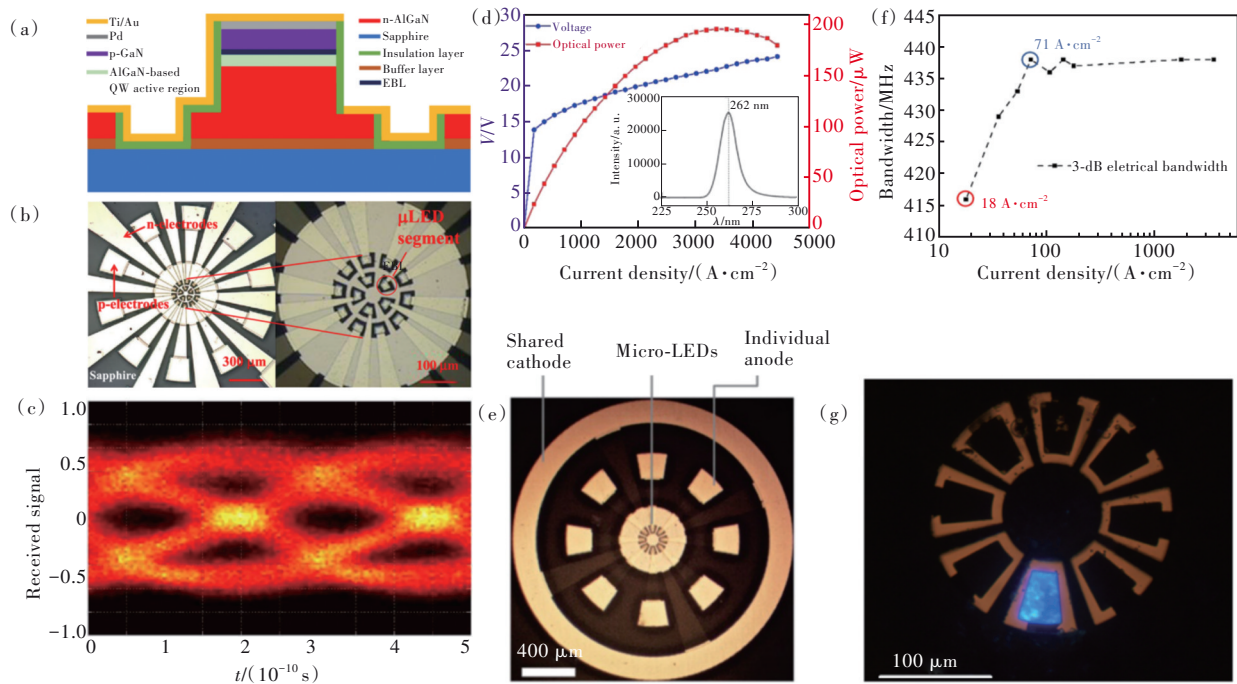


图2 (a)GLA报道的15个发射波长为262 nm的Micro-LEDs的外延结构;(b)用于光通信的阵列照片;(c)OOK调制下的800 Mbps通信所得眼图;(d)单个微像素(Micropixel)的 $J$ - $V$ 与 $LOP$ - $J$ 曲线,插图为其在1 768  $\text{A}/\text{cm}^2$ 下的电致发光光谱<sup>[3]</sup>;(e)用于波分复用实验的UVB器件结构<sup>[4]</sup>;(f)-3 dB带宽作为注入电流密度的函数图;(g)器件点亮图<sup>[3]</sup>。

Fig.2 (a)GLA reported the epitaxial structure of Micro-LED. (b)Optical communication LED array. (c)Communication experiment under the OOK modulation of 800 Mbps get eye diagram. (d) $J$ - $V$  and  $LOP$ - $J$  curve of micropixel and its illustration is the EL spectral in 1 768  $\text{A}/\text{cm}^2$ . (e)UVB device structure for the wavelength division multiplexing experiment<sup>[4]</sup>. (f)-3 dB bandwidth as a function of the injected current density. (g)Light photography of the individual Micro-LED<sup>[3]</sup>.



研究发现 LED 的带宽会随着注入电流的密度增加而增加, 在  $71 \text{ A/cm}^2$  条件下带宽于  $438 \text{ MHz}$  处饱和, 因为所用的光电探测器 (APD) 的截止频率接近  $450 \text{ MHz}$ , 最终没有测量出 LED 的极限带宽<sup>[32]</sup>。该工作  $\text{LOP} < 1 \text{ mW}$  且  $\text{WPE} < 1\%$ , 不能够满足较长距离的光通信要求<sup>[33]</sup>。尽管如此, 它是首例采用紫外 UVC Micro-LED 制备光通信芯片的研究, 并对物理学机制如亮度的下降现象等进行了初步的探索。

2020 年, 该团队分析了减小 Mesa 尺寸对 UVC Micro-LED 的发射波长、达到 EQE 最大值时的电流密度和  $-3 \text{ dB}$  带宽等参数的影响, 并分析了产生这些现象的物理机制。研究发现, 随着像素的尺寸从  $150 \mu\text{m}$  减小到  $20 \mu\text{m}$ ,  $-3 \text{ dB}$  带宽从  $0.25 \text{ GHz}$  逐渐增加到  $0.55 \text{ GHz}$ , 展示出强烈的尺寸依赖性; 由于刻蚀侧壁引入的晶格缺陷和大注入电流共同作用, 肖克利-里德-霍尔复合与俄歇复合增加, 导致 EQE 发生 droop 效应时所对应的注入电流密度增加。对于激发波长, 由于产热和能带填充效应的叠加作用, 所有 LED 的发射波长会随着注入电流增加而发生红移, 随着 LED 尺寸从  $80 \mu\text{m}$  缩小到  $20 \mu\text{m}$ , 这种红移量逐渐增加。随着单个 LED 尺寸从  $20 \mu\text{m}$  增加到  $200 \mu\text{m}$ , LOP 的峰值从  $0.1 \text{ mW}$  增加到  $1.6 \text{ mW}$ , 反映出在大注入条件下, 紫外 LED 的峰值光功率和尺寸之间存在正向关联<sup>[34]</sup>。

随后, 南卡罗莱纳大学 Floyd 团队报道了 Al-GaN 基 Micro-LED 阵列的光-热特性与 Mesa 尺寸之间的关系。报道中采用了原子层沉积技术生长  $\text{Al}_2\text{O}_3$  作为 P、N 电极钝化层, 并使用双层互联技术, 将单个 Micro-LED 像素互联成发光阵列。随着 Micro-LED 尺寸的减小, 同样注入电流密度下, 芯片的产热减少, 亮度更大, 因此在更大的电流密度下实现了更大的峰值亮度。比如在  $10.2 \text{ kA/cm}^2$  下, Mesa 半径  $5 \mu\text{m}$  像素的亮度高达  $291 \text{ W/cm}^2$ , 是  $90 \mu\text{m}$  器件的 30 倍。文献中还提到, 随着 Micro-LED 阵列的像素尺寸减小, 每个像素的热阻显著减小, 散热性能增强; 但对于单个器件尺寸为  $5 \mu\text{m}$  的阵列来说, 进一步通过减小像素尺寸已经对热阻的量级不产生显著影响。总之, 对于同样发射面积的 Micro-LED 阵列, 像素尺寸越小, 阵列的工作电压越小, 整体并联微分电阻越小, 在同样注入电流密度下相应地光提取效率越好, 光电

转化效率 (Wall-plug efficiency, WPE) 越大。因此, 理想像素 Mesa 尺寸在  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  范围内<sup>[35]</sup>。但该工作没有继续研究不同的几何结构是否会对器件的物理性能产生影响<sup>[36]</sup>。

日本东北大学 Kojima 探寻了由蓝宝石衬底的邻位角不同引起的 AlGaN 量子阱 Micro-LED 的内量子效率 (Internal quantum efficiency, IQE) 和带宽不同的机制。研究表明, LED 的带宽主要是 RC 时间常数决定, 不是载流子复合寿命决定的; 具有  $0.3^\circ$  邻位角的衬底的 Micro-LED 比  $1^\circ$  邻位角对照物的 IQE 更大, 电容更小。这是因为小邻位角的蓝宝石衬底上生长的量子阱有许多低电阻率的富 Ga 微路径, 注入电流优先通过这些微路径, 更有可能发生辐射复合。这时的 LED 可以看成是由  $1 \mu\text{m}$  尺寸的自组装 Micro-LED 并联形成。微路径的存在降低了并联电容和电阻效应并提升了带宽<sup>[11]</sup>。

2021 年, Floyd 研究了分别使用  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  覆盖垂直侧壁和倾斜侧壁两种工艺对 Micro-LED 的光提取效率的影响。一方面, 比较均覆盖着散热层的器件, 研究发现倾斜侧壁的 Micro-LED 比垂直侧壁的 Micro-LED 具有更高的 LEE。倾斜侧壁器件的 LEE 随 Mesa 尺寸从  $90 \mu\text{m}$  减小到  $5 \mu\text{m}$  逐渐增强, 这归因于材料的横向吸收长度较短 ( $< 20 \mu\text{m}$ ), 更多的横磁 (Transverse magnetic, TM) 极化光子发射能在被半导体横向材料吸收之前已被提取。另一方面, 控制侧壁倾角不变, 盖有  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  层的器件相比裸露侧壁的器件, 侧壁的反射率更低, 不利于光提取但有益于散热, 即部分牺牲了 EQE 但提升了 WPE<sup>[37]</sup>。该研究对 Micro-LED 阵列的性能增强机理仍需探索, 也需要对每个像素及阵列中的光学传播进行系统研究<sup>[38]</sup>。

中国科学技术大学孙海定团队使用主发射波长为  $280 \text{ nm}$  的 Micro-LED 研究了不同侧壁角度对光提取的影响。研究表明, 小的侧壁角 ( $33^\circ$ ) 将导致更多从有源区发射的光被侧壁向蓝宝石衬底侧反射。横向传播的 TM 光子朝衬底的引导被增强, 是倾斜侧壁引起 LEE 改善的机制。时域有限差分仿真得到最适宜的侧壁角在  $25^\circ \sim 35^\circ$  范围<sup>[36]</sup>。随后, 该团队报道了  $275 \text{ nm}$  AlGaN 基单颗 Micro-LED 的光电特性的尺寸依赖性。随着单个像素尺寸的减小, 漏电流增加、EQE 小幅增加, 微分串联电阻近似正比于 Mesa 的直径  $D$  的  $-2$  次方,

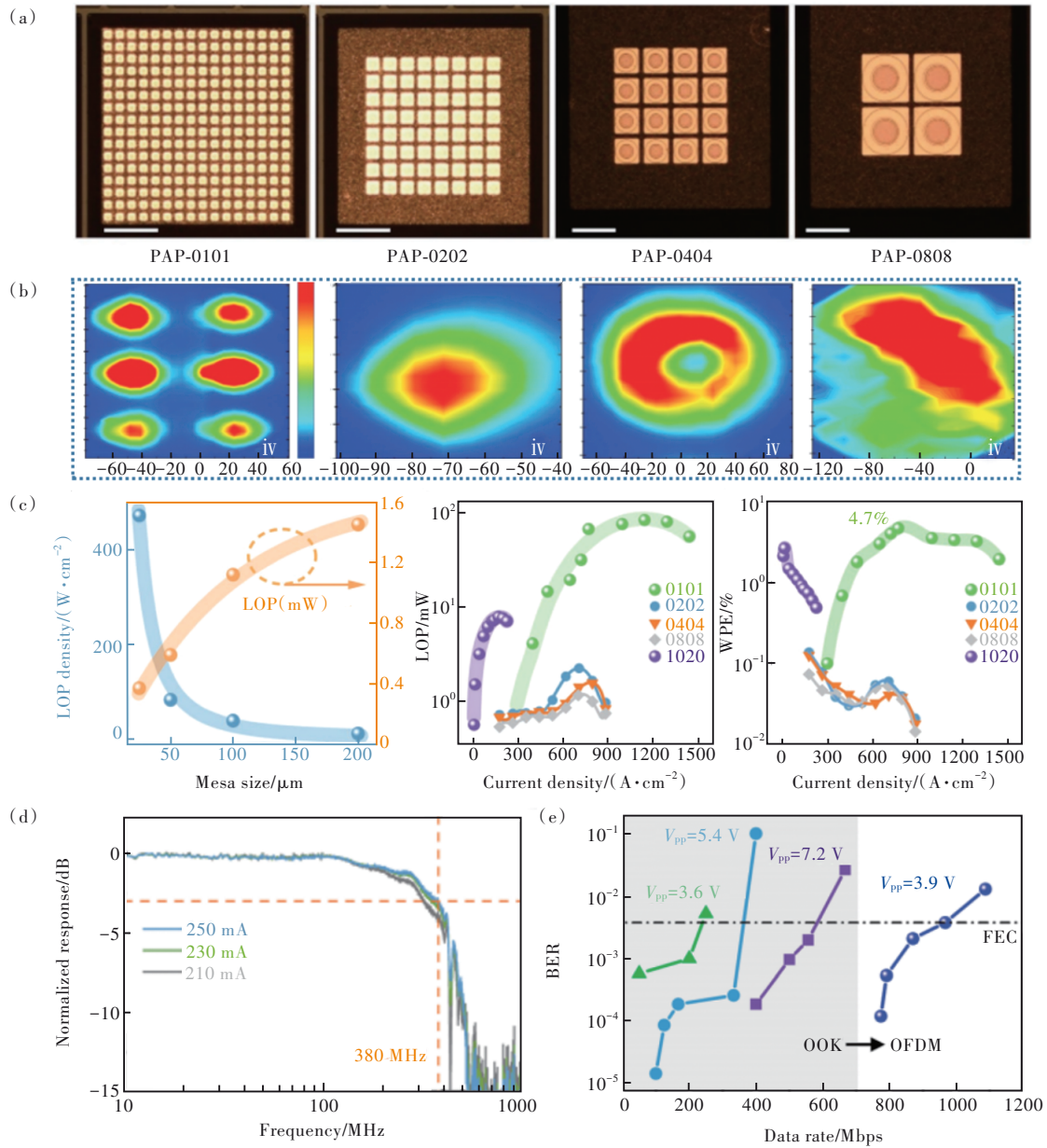


图3 (a)北京大学报道的像素尺寸为25, 50, 100, 200  $\mu\text{m}$ 的 $\mu$ LED阵列光学显微图像;(b)四种芯片在大电流密度下的EL成像图;(c)单独成像的LOP和亮度的尺寸依赖性及四种芯片的LOP和WPE的电流密度依赖性;(d)电流为210, 230, 250 mA时的频率相关调制带宽;(e)在不同信号调制深度下误比特率(Bit error rate, BER)与数据速率的关系<sup>[33]</sup>。

Fig. 3 (a)Optical microscopic images of  $\mu$ LED arrays with pixel sizes of 25, 50, 100, 200  $\mu\text{m}$  reported by PKU. (b)The micro-EL mapping images at high current densities for four chips. (c)LOP and corresponding LOP density of the stand-alone-mesa device with various mesa sizes and the current density dependence of LOP and WPE for the four chips. (d) Frequency-dependent modulation bandwidth at currents of 210, 230, 250 mA. (e)BER versus data rate at different signal modulation depth<sup>[33]</sup>.

$D$ 越小,单个像素的串联电阻越大。同时观察到,随着单个像素尺寸减小,相同偏置电流下,EL发射波长的红移量增加。这与尺寸减小时的热功率密度增加有关,当使用脉冲电流激励,红移现象消失。在大电流密度下,较小的Micro-LED中可以观察到半峰宽(FWHM)因热辐射效应而产生明显

拓宽现象<sup>[38]</sup>。

2022年,北京大学王新强团队使用25  $\mu\text{m}$  Mesa尺寸的Micro-LED实现了 $400 \text{ W/cm}^2$ 的亮度,并组成 $16 \times 16$ 的阵列,研究了相同发光面积、不同像素尺寸 $\mu$ LED阵列的电光特性随Mesa尺寸减小的变化。首先,亮度随Mesa尺寸增加而减小,

呈现出与 Mesa 面积成反比的趋势。因为小尺寸 Mesa 应变弛豫, 引起每个像素的多量子阱的量子限制 Stark 效应减弱<sup>[39]</sup>。因此在相同注入电流密度下, 单颗 Mesa 尺寸越小, 发射波长蓝移量越大。当像素尺寸大于 25  $\mu\text{m}$  时, 电流拥挤和自热效应<sup>[40]</sup>较为明显, 因此最适宜的 Mesa 尺寸小于 25  $\mu\text{m}$ <sup>[33]</sup>。

同年, 中国科学院半导体研究所魏同波团队探究了主发射波长为 275 nm 的 AlGaIn 基 Micro-LED 阵列的带宽随器件 Mesa 尺寸的变化。研究发现, 在同样电流注入水平, 和相同发光面积的传统 LED 器件相比, Micro-LED 阵列的主发射波长会发生蓝移, 半波宽也会变窄, 这是应变的弛豫和散热的改善引起的变化<sup>[41]</sup>。

同年, 中国香港科技大学郭海成团队利用电感耦合等离子刻蚀 (Inductively coupled plasma, ICP) 和混合化学处理两种工艺制作了发射波长在

269 nm 的 Micro-LED。研究表明, 在 ICP 刻蚀后使用四甲基氢氧化铵 (Tetramethylammonium hydroxide, TMAH) 溶液适当处理将修复侧壁损伤, 可以提升辐射复合效率, 有利于提升器件 IQE。采用 ICP 和 TMAH 循环的方法对器件侧壁出光面做纳米尺度粗化处理, 有利于大幅提升侧壁出光<sup>[42]</sup>。

同年, 复旦大学田朋飞团队研究了 Micro-LED 的 EQE 改善机制。总所周知, LED 中效率下降的原因是不均匀的电流密度所加剧的载流子局域化、泄露、俄歇复合、过热的共同作用。在 >200  $\mu\text{m}$  的大尺寸 LED 中, 大注入下随电流密度增加而原本就不均匀的俄歇复合加剧, 这是器件效率下降的主要原因。实验表明, 相比于大面积 LED, 更小尺寸的 Micro-LED 有着更加均匀的电流扩展和更加优良的光提取性能, 对出光效率的提升有关键作用<sup>[43]</sup>。目前报道的深紫外 Micro-LED 及其阵列的电光性能总结于表 2 中。

表 2 已报道的深紫外 Micro-LED 或阵列的电-光性能

Tab. 2 The reported photo-electric performance of deep UV Micro-LEDs or arrays

年份	像素/ $\mu\text{m}$	波长/ nm	阵列 组成	面积/ $\mu\text{m}^2$	最大 LOP/ mW	峰值 效率	带宽/ MHz	文献
2019	27	262	15	15×566	0.196(3 400 A/cm <sup>2</sup> 单颗)	—	438(70 A/cm <sup>2</sup> )	[3]
	20	280	—	400(近似)	0.1	—	550	[34]
2020	5	280	324	6 360	18.507 6(10.2 kA/cm <sup>2</sup> )	1.5%	—	[35]
	100	285	单颗	70 000	—	—	184(7.5 V)	[11]
2021	20	280	单颗	314	0.125 6(2 kA/cm <sup>2</sup> )	1%	—	[36]
	20	275	单颗	314	0.270 04	1.2%	—	[38]
	5	275	324	6 360	0.636(50 kA/cm <sup>2</sup> )	2.0%	—	[37]
2022	25	280	16×16	129 032	83.5(230 mA)	4.7%(WPE)	380(250 mA)	[33]
	60	275	4×4	153 000	>19.125(75 A/cm <sup>2</sup> )	4%	380(10 A/cm <sup>2</sup> )	[41]
2022	40	281.7	8	8×1 369	0.48	—	960(6 mA)	[4]
	20	269	单颗	400	0.057 6(100 A/cm <sup>2</sup> )	3.45%	—	[42]
	8	273	单颗	64	0.064(12 kA/cm <sup>2</sup> )	1.0%	—	[43]
	100	276.8	单颗	10 000	0.854(50 mA)	—	452.53(500 A/cm <sup>2</sup> )	[44]

与相同面积的 LED 芯片相比, 随着像素尺寸的减小, Micro-LED 阵列的 WPE 和 LEE 明显增加, 由于大注入下的局部高电流密度和侧壁损伤引起的非辐射复合减少, EQE 的提升不明显。根据热阻<sup>[35]</sup>、电流拥挤<sup>[43]</sup>、横向光吸收<sup>[37]</sup>和侧壁出光<sup>[45]</sup>的等约束条件, 最适合的 Mesa 尺寸 <20  $\mu\text{m}$ 。可以通过倾斜侧壁<sup>[36]</sup>、淀积散热层<sup>[35]</sup>、化学处理<sup>[42]</sup>和表面离子注入<sup>[46]</sup>来提升器件效率。在物理机制方面, 在大电流注入下, 增大电流密度而产生的热而引起单个 Micro-LED 的发射波长红移现象, 可以通过脉冲激励消除。尽管 Micro-LED 也存在局部过

度俄歇复合<sup>[42]</sup>但相同电流密度时, 相比传统 LED 电流扩展性能, Micro-LED 更有优势。目前 Micro-LED 的制备工艺仍不完善, 对光刻精度、欧姆电极金属体系、退火、侧壁钝化甚至外延片的质量要求很高, 研究人员仍需面临重大挑战。

### 3.2 紫外 Micro-LED 的通信性能

目前用于通信的 Micro-LED 的最高记录是 4.667 Gbps 的通讯速率<sup>[47]</sup>和 17 m 的有效通讯距离<sup>[48]</sup>。

2022 年, 北京大学王新强团队制备的 25  $\mu\text{m}$  像素 Micro-LED 阵列是目前用于紫外光通信的最



小尺寸阵列,测得的最高通信速率为 0.97 Gbps,由于驱动方式的限制,仍然保留了速率提升的巨大潜力<sup>[33]</sup>。同年,格拉斯哥大学顾而丹等对 280 nm 波长的 Micro-LED 光通信芯片的偏置条件和数据编码方案进行了系统性的优化,使用 UV-C Micro-LED 达到最远 17 m 的距离,同时保持大于 4 Gb/s 的无差错数据速率。这是目前基于 Gb/s UV-C LED 的 OWC 的最远通信距离<sup>[48]</sup>。

目前来看,在自由空间光通信方面,相对于可见光通信芯片<sup>[31]</sup>,采用倒装工艺制备紫外通信芯片<sup>[3]</sup>的研究报道较少,因此寻找合适的材料改良工艺是解决这种困境的办法。但在片上通信方面,紫外光在激发沿横向波导耦合 TM 光子方面具有天然的优势,制备工艺与传统工艺兼容,有巨大的应用潜力。相关报道被总结在表 3 中。

表 3 紫外光通信用 Micro-LED 通信性能参数

Tab. 3 Communication performance of the Micro-LEDs for UVOWC

年份	峰值带宽/MHz	距离/m	调制方法	光源波长/nm	光源组成	速率/Gbps	文献
2019	438	0.3(LOS)	OOK	262	Micro-LED 阵列	0.8	[3]
			OFDM			1.1	
2020	153	>1.5(LOS)	—	285	单颗 Micro-LED	2(室内),1(室外)	[11]
2021	452.53	0.5	16-QAM-OFDM 和 预均衡技术	276.8	单颗 Micro-LED (100 μm)	2	[44]
		3				0.82	
		5				4.667	
2021	600	0.3	OFDM	285	Micro-LED 阵列	>4	[47]
		5				0.557	
2021	380	0.7	OOK	279	Micro-LED 阵列 (25 μm)	0.97	[33]
			OFDM			0.97	
2022	—	17	—	280	Micro-LED 阵列	>4	[48]
2022	1 300	0.5	OFDM(波分复用)	373.4(UVA)、316.5 (UVB)、281.7(UVC)	Micro-LED 组合阵列	3.13(仅 UVC)、 10.32(组合速率)	[4]

#### 4 紫外光通信的片上集成

光集成(Photonics integrated chips, PIC)具有减小系统尺寸、降低功率和成本的优势<sup>[49]</sup>。多量子阱二极管具有发光-检测现象,十分适合作为光互联器件用在可见光和紫外光波段的集成光电系统中,以减少电互联引起的功耗和延迟。目前使用可见光<sup>[50]</sup>与紫外光集成器件进行通信的实验已有报道。

2023 年,魏同波团队使用具有非对称多量子阱结构的 InGaN 材料制造了有 450 nm 波长可见光 LED、波导和光探测器(Photodetectors, PD)的单片集成芯片。使用这种非对称外延结构后,LED 的 EL 与 PD 的响应之间的光谱重叠增加了 4.5 倍,PD 的光暗电流比增加 7 个数量级,增强了 LED 与 PD 间的光连接<sup>[51]</sup>。

由于环境光引入的背景噪声和串扰难以避免,片上可见光通信将受到限制。并且,可见光 LED 发射以主要沿垂直方向传播的横电(Transverse electric, TE)极化光子为主<sup>[52-53]</sup>,这对需要沿

波导的横向光耦合与传播是不利的<sup>[54]</sup>。相比之下,对于发射波长<280 nm 的 UVC LED,光主要以横向传播的 TM 极化<sup>[55]</sup>。因此,用 UVC LED 做集成芯片有实现更高效通信的潜力<sup>[54]</sup>。

2018 年,名古屋大学 Amano 报道了一种 286 nm 多元件集成系统,其中两个相同的多量子阱 LED 与波导一起集成在单个芯片上。该系统兼容现有的 LED 制备工艺,并且通过利用多量子阱结构 LED 的收发同时(Simultaneous emission-detection phenomenon)结构,在两个二极管之间建立光学链路。收发同时,即一个多量子阱二极管将电信息转录为要耦合到波导中的光信号,然后,被引导的光沿着波导传播到另一个多量子阱二极管,该二极管将光信号转换成电信号,可以作为 PD 使用,实现了 50 Mbps 的光传输<sup>[56]</sup>。

2020 年,中国香港科技大学刘纪美团队基于 Si 上生长的 P-GaN /AlGaN/GaN 异质结构,将高性能日盲区紫外检测器<sup>[57]</sup>与 360 nm 波长的 Micro-LED 进行片上集成。在集成 LED 工作下 PD 具有  $1.5 \times 10^6$  的高光暗电流比和 0.41/0.36 s 的上升/下



降时间, 这项研究验证了单片集成 LED 和 PD 在 Si 基芯片上可实现片内通信的能力<sup>[58]</sup>。

同年, Floyd 报道了一种 UVC PIC, 它由发光波长为 280 nm、台面尺寸为 100 μm × 100 μm 的 AlGaIn 基 Micro-LED、响应波长为 250 nm 的 PD、作为波导的 1.5/3.5 μm 厚的 N-AlGaIn/AlN/蓝宝石介质层三部分组成。虽然 LED 发射和 PD 的响应波长

不同, 但波谱具有足够的重叠, 可以支持百兆速率传输。结果显示, LED 工作时, PD 接收到的光全部来自介质波导层, 其中 N-AlGaIn 层、AlN 和蓝宝石中分别占 80%、7% 和 13%。波导中传播衰减系数约为 23 cm<sup>-1</sup>, 这证明了波导可以有效限制并传导紫外光信号。研究还发现, 通过在晶片背面涂覆紫外线吸收材料可以有效减少信号间的串扰<sup>[59]</sup>。

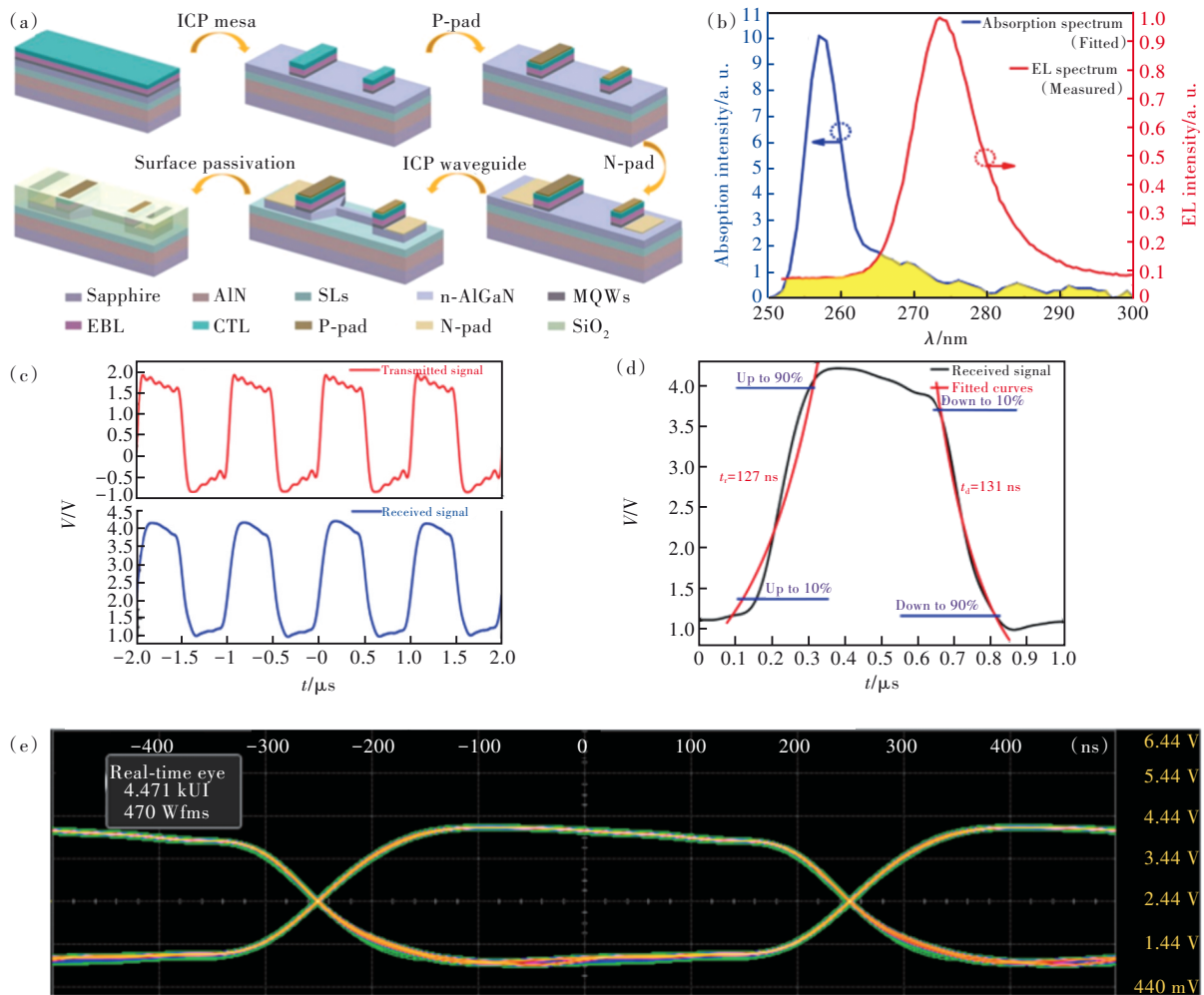


图 4 (a) 单片集成器件的详细制备工艺; (b) S1-LED 在 20 mA 下的归一化 EL 光谱和片上 S1-PD 的拟合吸收光谱; (c) S1-LED 上加的发送信号和 S1-PD 捕获的接收信号; (d) 用 S1-PD 实验数据拟合的上升和衰减时间曲线; (e) 片上光通信实验测得的眼图, 所用频率为 1 MHz<sup>[54]</sup>。

Fig.4 (a) Fabrication processes of the monolithically integrated devices. (b) Normalized EL spectrum of S1-LED operated at 20 mA and fitted absorption spectrum of the on-chip S1-PD. (c) Transmitted signal loaded on S1-LED and received signal captured by S1-PD. (d) Rise and decay time constant curves fitted with the experimental data obtained from S1-PD. (e) Eye diagrams for on-chip light communication measured at 1 MHz<sup>[54]</sup>.

2022 年, 魏同波团队在一片 AlGaIn 多量子阱晶元上成功制备了集成有 274 nm 波长 LED、光波导与光探测器三种器件的通讯芯片。文中解释了相同多量子阱结构的 LED 与自驱动 PD 的收发同时。相比较以往报道的氮化物紫外 PD, 该文章中报道的自驱动 PD 在片上通信实验

中上升/下降时间响应为 127/131 ns, 相邻的光学串扰降低了 70%, 是目前报道 UVC APD 的最高性能<sup>[54]</sup>。

相比较选择性区域外延<sup>[58]</sup>, 直接采用氮化物外延薄膜来制作单片集成系统更具潜力, 是目前的重点研究方向之一<sup>[60]</sup>。表 4 汇总了近期文献报

表 4 光集成芯片通信性能

Tab. 4 Communication performance of the PIC

年份	片上光集成 系统组成	带宽/ MHz	距离/ $\mu\text{m}$	LED 波长/ nm	LED 尺寸	速率/ Mbps	文献
2014	蓝光 LED、GaN 探测器	3(大约)	250	365	$295 \mu\text{m} \times 255 \mu\text{m}$	—	[61]
2018	两只用于发光和检测紫外 LED、波导	—	100	286.4	$R=170 \mu\text{m}$ (圆形 LED)	50	[56]
2020	Si 基紫外 Micro-LED(2)、PD、波导	—	2 000	280	$100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$	—	[58]
2021	Micro-LED(3)、PD	—	20	360	$30 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$	—	[59]
	LED、波导、PD	173	600	450	$400 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$	—	[51]
2022	两只用于发光-检测紫外 LED、波导	1	600	270	$196 \mu\text{m}^2$	—	[54]
	紫外 Micro-LED、PD	497.58	$10^6$ (自由空间)	277	$R=40 \mu\text{m}$ (圆形 LED)	1 600	[60]

道的光集成芯片的性能。从表 4 中可以看出,相比较自由空间紫外光通信,片上环境对传输距离的要求较低,但目前相关研究不多,物理机制还需进一步探索。

## 5 结论与展望

商用 UVC LED 的研究方向主要集中在 WPE 提升和 LEE 优化方面,目前可量产的芯片的 LEE 从 6%~12% 向 25% 提升,WPE 由 3%~6% 提升至 10%。商用器件的主要发射波长集中在 260~280 nm 波段,寿命基本在 5 000 h 以上。商用产品性能提升所面临的挑战来自于外延、芯片及封装领域,包括提升材料质量、优化封装材料、改善欧姆接触等。

目前,部分实验室制备器件的 WPE 可达 6%~10%,预计 2026 年可突破 15%。总体来看,UVC-LED 芯片 WPE 提升可以在材料选择、外延芯片工

艺、独特的封装技术上探索。

将紫外 LED 和 APD 集成有望实现多功能系统,如实时检测光强的通信、照明芯片等,但目前该领域研究较少。大力发展 Micro-LED 是改善目前芯片光提取效率差、亮度低的最有效方案之一。目前对于 Micro-LED 的研究集中在物理机制领域,验证了它在提升紫外 LED 性能方面的潜力<sup>[62]</sup>。后续应改善其制备工艺,兼顾成本和可靠性,最终实现在商用领域的高水平应用。

虽然目前受限于工艺发展水平,紫外光通信 LED 芯片性能和可见光 LED 尚有差距,但随着研究的深入,高性能、高可靠性的 UVC Micro-LED 的广泛应用指日可待!

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230099>.

## 参 考 文 献:

- [1] 赵太飞, 郭磊. 无线紫外光通信网络技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
ZHAO T F, GUO L. *Wireless Ultraviolet Communication Network Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [2] VAVOULAS A, SANDALIDIS H G, CHATZIDIAMANTIS N D, et al. A survey on ultraviolet C-Band (UV-C) communications [J]. *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 2019, 21(3): 2111-2133.
- [3] HE X Y, XIE E Y, ISLIM M S, et al. 1 Gbps free-space deep-ultraviolet communications based on III-nitride micro-LEDs emitting at 262 nm [J]. *Photonics Res.*, 2019, 7(7): B41-B47.
- [4] MACLURE D M, MCKENDRY J J D, ISLIM M S, et al. 10 Gbps wavelength division multiplexing using UV-A, UV-B, and UV-C micro-LEDs [J]. *Photonics Res.*, 2022, 10(2): 516-523.
- [5] 孙兆田. 基于紫外 LED 阵列的高速通信系统研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2018.  
SUN Z T. *Research on High-speed Ultraviolet Communication System Based on LED Array* [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. (in Chinese)

- [ 6 ] GUO L, GUO Y N, WANG J X, *et al.* Ultraviolet communication technique and its application [J]. *J. Semicond.*, 2021, 42(8): 1-13.
- [ 7 ] WANG L J. *Ultraviolet Communication Network Modeling and Analysis* [D]. Riverside: University California at Riverside, 2011.
- [ 8 ] XU Z Y, SADLER B M. Ultraviolet communications: potential and state-of-the-art [J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2008, 46(5): 67-73.
- [ 9 ] KUO S Y, CHANG C J, HUANG Z T, *et al.* Improvement of light extraction in deep ultraviolet GaN light emitting diodes with mesh P-contacts [J]. *Appl. Sci.*, 2020, 10(17): 5783-1-8.
- [ 10 ] RASHIDI A, NAMI M, MONAVARIAN M, *et al.* Differential carrier lifetime and transport effects in electrically injected III-nitride light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2017, 122(3): 035706-1-9.
- [ 11 ] KOJIMA K, YOSHIDA Y, SHIRAIWA M, *et al.* Self-organized micro-light-emitting diode structure for high-speed solar-blind optical wireless communications [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, 117(3): 031103-1-4.
- [ 12 ] 李晋闯, 闫建昌, 郭亚楠, 等. 紫外 LED 研究进展 [J]. 科技导报, 2021, 39(14): 30-41.  
LI J M, YAN J C, GUO Y N, *et al.* Recent progress of ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Sci. Technol. Rev.*, 2021, 39(14): 30-41. (in Chinese)
- [ 13 ] KASHIMA Y, MAEDA N, MATSUURA E, *et al.* High external quantum efficiency (10%) AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes achieved by using highly reflective photonic crystal on p-AlGaIn contact layer [J]. *Appl. Phys. Express*, 2018, 11(1): 012101-1-4.
- [ 14 ] 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]. *Appl. Phys. Express*, 2017, 10(3): 031002.
- [ 15 ] ZHANG L, GUO Y N, YAN J C, *et al.* Deep ultraviolet light-emitting diodes based on a well-ordered AlGaIn nanorod array [J]. *Photonics Res.*, 2019, 7(9): B66-B72.
- [ 16 ] SHAW G A, SIEGEL A M, MODEL J. Extending the range and performance of non-line-of-sight ultraviolet communication links [C]. *Proceedings of SPIE 6231, Unattended Ground, Sea, and Air Sensor Technologies and Applications VIII, Orlando (Kissimmee), United States*, 2006: 63210C.
- [ 17 ] KEDER D, ARNON S. Subsea ultraviolet solar-blind broadband free-space optics communication [J]. *Opt. Eng.*, 2009, 48(4): 046001-1-7.
- [ 18 ] 赵明. 高速率紫外光通信系统接收端研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
ZHAO M. *Study on Receiver of High Data Rate Ultraviolet Communication System* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [ 19 ] 赵太飞, 何华, 柯熙政. 基于日盲紫外光 LED 的无线光通信性能研究 [J]. 光电子·激光, 2011, 22(12): 1797-1801.  
ZHAO T F, HE H, KE X Z. Performance research on wireless optical communication based on solar blind UV LED [J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2011, 22(12): 1797-1801.
- [ 20 ] HAN D H, LIU Y L, ZHANG K, *et al.* Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(14): 15833-15842.
- [ 21 ] WU M L, HAN D H, ZHANG X, *et al.* Experimental research and comparison of LDPC and RS channel coding in ultraviolet communication systems [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(5): 5422-5430.
- [ 22 ] GUO L, MENG D D, LIU K L, *et al.* Experimental research on the MRC diversity reception algorithm for UV communication [J]. *Appl. Opt.*, 2015, 54(16): 5050-5056.
- [ 23 ] 黄刚, 唐义, 黄河清, 等. 全向紫外光通信技术研究 [J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(4): 409-413.  
HUANG G, TANG Y, HUANG H Q, *et al.* Study of Omni-directional ultraviolet communication [J]. *Trans. Beijing Inst. Technol.*, 2015, 35(4): 409-413. (in Chinese)
- [ 24 ] 罗易雪. 紫外通信信道特性研究以及语音通信平台搭建 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.  
LUO Y X. *Study on the Characteristics of Propagation of Ultraviolet Communication System and Voice Communication Platform Building* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [ 25 ] SUN X B, ZHANG Z Y, CHAABAN A, *et al.* 71-Mbit/s ultraviolet-B LED communication link based on 8-QAM-OFDM



- modulation [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(19): 23267-23274.
- [26] KOJIMA K, YOSHIDA Y, SHIRAIWA M, *et al.* 1. 6-Gbps LED-based ultraviolet communication at 280 nm in direct sunlight [C]. *Proceedings of 2018 European Conference on Optical Communication, Rome Italy*, 2018: 1-3.
- [27] ALKHAZRAGI O, HU F C, ZOU P, *et al.* 2. 4-Gbps ultraviolet-C solar-blind communication based on probabilistically shaped DMT modulation [C]. *Proceedings of 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, San Diego, USA*, 2020: 1-3.
- [28] ALKHAZRAGI O, HU F C, ZOU P, *et al.* Gbit/s ultraviolet-C diffuse-line-of-sight communication based on probabilistically shaped DMT and diversity reception [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(7): 9111-9122.
- [29] TIAN P F, SHAN X Y, ZHU S J, *et al.* AlGaIn ultraviolet Micro-LEDs [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2022, 58(4): 3300214-1-14.
- [30] LI D, LIU S F, QIAN Z Y, *et al.* Deep-ultraviolet micro-LEDs exhibiting high output power and high modulation bandwidth simultaneously [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(19): 2109765-1-10.
- [31] 王轩. 氮化镓基 Micro-LED 的制备及其可见光通信性能研究 [D]. 南京: 南京大学, 2021.  
WANG X. *Preparation of GaN-based Micro-LEDs and Their Visible Light Communication Performance* [D]. Nanjing: Nanjing University, 2021. (in Chinese)
- [32] HE X Y, XIE E Y, ISLIM M S, *et al.* 1 Gbps free-space deep-ultraviolet communications based on III-nitride micro-LEDs emitting at 262 nm [J]. *Photonics Res.*, 2019, 7(7): B41-B47.
- [33] LI D, LIU S F, QIAN Z Y, *et al.* Deep-ultraviolet micro-LEDs exhibiting high output power and high modulation bandwidth simultaneously [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(19): 2109765-1-10.
- [34] MACLURE D M, MCKENDRY J J D, HERRNSDORF J, *et al.* Size-dependent characterization of deep UV micro-light-emitting diodes [C]. *Proceedings of 2020 IEEE Photonics Conference, Vancouver, BC, Canada*, 2020: 1-2.
- [35] FLOYD R, GAEVSKI M, ALAM D, *et al.* An opto-thermal study of high brightness 280 nm emission AlGaIn micropixel light-emitting diode arrays [J]. *Appl. Phys. Express*, 2021, 14(1): 014002-1-7.
- [36] TIAN M, YU H B, MEMON M H, *et al.* Enhanced light extraction of the deep-ultraviolet micro-LED *via* rational design of chip sidewall [J]. *Opt. Lett.*, 2021, 46(19): 4809-4812.
- [37] FLOYD R, GAEVSKI M, HUSSAIN K, *et al.* Enhanced light extraction efficiency of micropixel geometry AlGaIn DUV light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Express*, 2021, 14(8): 084002-1-5.
- [38] YU H B, MEMON M H, WANG D H, *et al.* AlGaIn-based deep ultraviolet micro-LED emitting at 275 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2021, 46(13): 3271-3274.
- [39] 郭海峰, 哈斯花, 朱俊. 外电场下应变量子阱中电子与空穴的本征态 [J]. *发光学报*, 2010, 31(6): 870-876.  
GUO H F, HA S H, ZHU J. Eigen-states of electron and hole in strained quantum well under external electric field [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2010, 31(6): 870-876. (in Chinese)
- [40] CHITNIS A, SUN J, MANDAVILLI V, *et al.* Self-heating effects at high pump currents in deep ultraviolet light-emitting diodes at 324 nm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81(18): 3491-3493.
- [41] GUO L, GUO Y N, YANG J K, *et al.* 275 nm Deep ultraviolet AlGaIn-based micro-LED arrays for ultraviolet communication [J]. *IEEE Photonics J.*, 2022, 14(1): 8202905-1-5.
- [42] FENG F, LIU Y B, ZHANG K, *et al.* Enhancing the optical and electrical properties of AlGaIn ultraviolet-C micro-LED *via* a hybrid scheme of plasma and chemical treatment [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 121(22): 221104-1-6.
- [43] QIAN Z Y, ZHU S J, SHAN X Y, *et al.* Analysis of the efficiency improvement of 273 nm AlGaIn UV-C micro-LEDs [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2022, 55(19): 195104-1-6.
- [44] ZHU S J, QIU P J, QIAN Z Y, *et al.* 2 Gbps free-space ultraviolet-C communication based on a high-bandwidth micro-LED achieved with pre-equalization [J]. *Opt. Lett.*, 2021, 46(9): 2147-2150.
- [45] YU H B, MEMON M H, JIA H F, *et al.* A 10×10 deep ultraviolet light-emitting micro-LED array [J]. *J. Semicond.*, 2022, 43(6): 062801-1-6.
- [46] 谭毅, 庄永漳, 卢子元, 等. 基于离子注入制备的 InGaIn 横向 Micro-LED 阵列 [J]. *发光学报*, 2021, 42(2): 215-222.  
TAN Y, ZHUANG Y Z, LU Z Y, *et al.* InGaIn-based lateral-structured Micro-LED array fabricated by ion implantation [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(2): 215-222. (in Chinese)

- [ 47 ] MCKENDRY J J D, XIE E Y, ISLIM M S, *et al.* 4 Gbps wireless optical communications up to 5 m using a UV-C micro-light-emitting diode array [C]. *Proceedings of 2021 IEEE Photonics Conference, Vancouver, BC, Canada, 2021*: 1-2.
- [ 48 ] MACLURE D M, MCKENDRY J J D, CHEN C, *et al.* Gb/s optical wireless communications up to 17 meters using a UV-C micro-light-emitting diode [C]. *Proceedings of 2022 IEEE Photonics Conference, Vancouver, BC, Canada, 2022*: 1-2.
- [ 49 ] 蒋林, 谢晓燕. 片内光通信技术综述 [J]. *通信技术*, 2008, 41(11): 69-71.  
JIANG L, XIE X Y. A survey of on-chip optical communication [J]. *Commun. Technol.*, 2008, 41(11): 69-71. (in Chinese)
- [ 50 ] WU M L, HAN D H, ZHANG X, *et al.* Experimental research and comparison of LDPC and RS channel coding in ultraviolet communication systems [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(5): 5422-5430.
- [ 51 ] HE R, WANG L L, CHEN R F, *et al.* Monolithically integrated photonic chips with asymmetric MQWs structure for suppressing Stokes shift [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 122(2): 021105-1-6.
- [ 52 ] SHAKYA J, KNABE K, KIM K H, *et al.* Polarization of III-nitride blue and ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86(9): 091107-1-3.
- [ 53 ] KAWANISHI H, SENUMA M, NUKUI T. TM-mode lasing and anisotropic polarization properties of AlGa<sub>N</sub> multiple quantum well lasers in deep-ultraviolet spectral region [C]. *Proceedings of SPIE 6473, Gallium Nitride Materials and Devices II, San Jose, California, United States, 2007*: 64731D.
- [ 54 ] HE R, LIU N X, GAO Y Q, *et al.* Monolithically integrated UVC AlGa<sub>N</sub>-based multiple quantum wells structure and photonic chips for solar-blind communications [J]. *Nano Energy*, 2022, 104: 107928-1-9.
- [ 55 ] NORTHROP J E, CHUA C L, YANG Z, *et al.* Effect of strain and barrier composition on the polarization of light emission from AlGa<sub>N</sub>/Al<sub>N</sub> quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(2): 021101-1-4.
- [ 56 ] YUAN J L, JIANG Y, SHI Z, *et al.* 286 nm monolithic multicomponent system [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2019, 58(1): 010909-1-5.
- [ 57 ] LYU Q F, JIANG H X, LAU K M. High gain and high ultraviolet/visible rejection ratio photodetectors using p-Ga<sub>N</sub>/Al-Ga<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures grown on Si [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, 117(7): 071101-1-5.
- [ 58 ] LYU Q F, JIANG H X, LAU K M, *et al.* Monolithic integration of ultraviolet light emitting diodes and photodetectors on a P-Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/Si platform [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(6): 8358-8364.
- [ 59 ] FLOYD R, HUSSAIN K, MAMUN A, *et al.* Photonics integrated circuits using Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N based UVC light-emitting diodes, photodetectors and waveguides [J]. *Appl. Phys. Express*, 2020, 13(2): 022003-1-4.
- [ 60 ] SHAN X Y, ZHU S J, QIU P J, *et al.* Multifunctional ultraviolet-C micro-LED with monolithically integrated photodetector for optical wireless communication [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2022, 40(2): 490-498.
- [ 61 ] JIANG Z Y, ATALLA M R M, YOU G J, *et al.* Monolithic integration of nitride light emitting diodes and photodetectors for bi-directional optical communication [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(19): 5657-5660.
- [ 62 ] ZHAN J L, CHEN Z Z, JIAO Q Q, *et al.* Investigation on strain relaxation distribution in Ga<sub>N</sub>-based  $\mu$ LEDs by Kelvin probe force microscopy and micro-photoluminescence [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(5): 5265-5274.



郭春辉(1998-),男,山西长治人,硕士研究生,2020年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事紫外光通信LED制备、优化及性能的研究。  
E-mail: Ch\_guo1998@163.com



刘乃鑫(1981-),男,辽宁铁岭人,博士,助理研究员,2009年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事宽禁带氮化物半导体材料的外延生长及发光器件的研究。  
E-mail: nxliu@semi.ac.cn