宽禁带半导体材料与器件专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022053002

单片集成发光与探测的 micro-LED 阵列及显示与可见光通信应用

单心怡，朱世杰，汪　舟，林润泽，崔旭高，方志来，顾而丹，田朋飞*

（复旦大学 信息科学与工程学院，上海 200438）

摘　要： GaN 基 micro-LED 阵列作为新兴的光源技术，已被证明可以在光通信及显示等领域发挥重要作用。如果阵列中的 micro-LED 能够探测毗邻区域像素的发光性能，将有望形成单片集成发光探测的多功能 micro-LED 阵列，从而推进未来物联网技术中满足小型化、低功耗需求的光子集成芯片的发展。文章通过实验验证了 InGaN/GaN 多量子阱结构可以在不同偏压下实现发光和探测的双重功能，从而证明了 micro-LED 阵列单片集成发光和实时探测的可行性，并进一步将其应用于高稳定性可见光通信以及显示阵列坏点实时检测中，拓宽了 micro-LED 阵列集成发光探测多功能的潜在应用领域。

关键词： 光子集成；micro-LED；显示；光通信

中图分类号： TN929.1；TN312.8　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0444－07

Multifunctional Micro-LED Array Monolithic Integration with Luminescence and Photodetection for Display and Visible Light Communication

SHAN Xinyi, ZHU Shijie, WANG Zhou, LIN Runze,
CUI Xugao, FANG Zhilai, GU Erdan, TIAN Pengfei

(School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200438, CHN)

Abstract: GaN-based micro-LED, as a burgeoning light source technology, has been demonstrated to play an important role in optical communication and display fields, etc. If the pixels in micro-LED array can detect the optical performance of the adjacent pixels, it is expected to realize multifunctional micro-LED array for monolithic integration with light detection, thus promoting the development of photonic integrated chips for Internet of Things technology toward miniaturization and low power consumption. It was experimentally verified that InGaN/GaN MQWs can realize the dual functions of luminescence and detection under different operating voltages, thus proving the feasibility of micro-LED array monolithic integrated luminescence and real-time detection. Moreover, micro-LED array was further applied in high stability visible light communication and real-time detection of dead pixels in display array, which broadens the potential applications of micro-LED array.

Key words: photonics integration; micro-LED; display; optical communication

收稿日期：2022－05－30.

基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFB3601000，2021YFB3601003，2021YFE0105300）；国家自然科学基金项目(61974031)；上海市科学技术委员会项目(21511101303)；江苏省重点研发计划（产业前瞻与关键核心技术）项目(BE2021008-2).

* **通信作者：**田朋飞　**E-mail:** pftian@fudan.edu.cn

0　引言

近年来，GaN 基 micro-LED 以其功耗低、响应速度快、发光效率高等优点在高速可见光通信、新型显示等领域备受关注[1-5]。相比于商用 GaN 基 LED 有限的调制带宽（10～20 MHz），micro-LED 作为一种有前景的光通信光源由于其较低的 *RC* 常数和能承载较高的工作电流密度使得其具有较高的调制带宽，已被证明能够在自由空间通信、水下通信、日盲通信等通信应用中实现较高的速率[6-8]。此外，micro-LED 优异的性能也开拓了显示、探测、能量收集等多种应用的探索。对于 micro-LED 显示，通过设计两种不同 In 组分多量子阱结构，利用脉冲宽度调制（PWM）技术改变脉冲电流占空比来实现 micro-LED 单芯片全彩显示已经被成功展示[9]。我们之前的工作中也深入探究了 micro-LED 作为光电探测器和太阳电池的性能，并基于 micro-LED 阵列实现了 MIMO 通信、水下充电和图像识别[10-12]。因而，具有多功能应用潜力的 micro-LED 有望在新兴物联网系统中发挥更大的作用。

随着新兴物联网技术向小型化，低功耗发展的需求不断增长，将发光二极管（LED）、光电二极管（PD）和波导等不同的光子元件集成在一起的光子集成片上系统得到了快速发展[13-14]。如果阵列中的 micro-LED 能够探测毗邻区域像素的发光性能，将有望形成单片集成发光探测的多功能 micro-LED 阵列，从而推进未来物联网技术中满足小型化、低功耗需求的光子集成芯片的发展。这种无需外接探测器的集成，能够兼容照明之外的更多应用功能，并且整个系统更稳定、更轻便、成本更低[15]。例如，利用 micro-LED 阵列发光进行高分辨率显示时，如果其中的 micro-LED 像素能够同时充当探测器的角色，便可以有效检测周围 micro-LED 的发光情况，从而能够筛选出显示坏点并利用有效修复手段进行修复。目前，科研人员对光子集成芯片开展了广泛研究，通过多种方法，包括在同一外延片上使用相同的多量子阱结构实现 LED 和探测器的双重功能，或通过选择性外延生长集成 LED，PD 等光子元件，在可见光波段、中近红外波段和紫外波段实现了片上光子集成芯片[16-21]。例如，基于 InGaN/GaN 量子阱结构具有光发射和光探测双重功能的原理，在同一外延片上制备了相同结构的 InGaN 蓝光 LED 和探测器，利用光电流作为反馈信号来调节发光 LED 的稳定光输出[16]。此外，对于紫外波段，有研究工作者通过选择性外延生长在特定区域生长 InGaN/GaN 和 AlGaN/GaN 异质结构，在单芯片上集成了蓝光 LED、可见光探测器、高电子迁移率晶体管和紫外光肖特基势垒探测器，可以实现互不干扰的双波段光探测[21]。

于是，本文提出了可见光发光像素点输出光功率稳定监测和可见光 micro-LED 显示检测坏点新方法。通过实验在蓝光 micro-LED 阵列中验证了单片集成发光和实时探测的可行性，并进一步将其应用于高稳定性可见光通信以及显示阵列坏点实时检测中，拓宽了 micro-LED 阵列集成发光探测多重功能的潜在应用场景，推动光子集成芯片的发展。

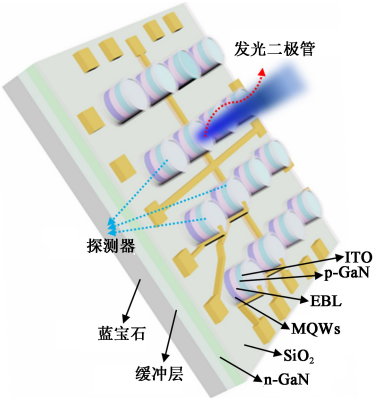
1　实验研究

为了研究 GaN 基 micro-LED 发光探测的性能，制备了像素尺寸为 80 μm 的蓝光 micro-LED 阵列。此外，搭建了可见光通信测试系统，将该 80 μm micro-LED 应用于可见光通信中，实现实时发光探测。后续为进一步验证其在显示性能中检测坏点的应用，又制备了用于显示的像素尺寸为 40 μm 的 micro-LED 阵列。

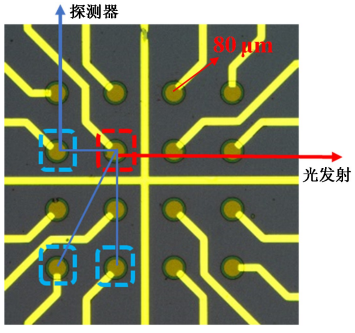
1.1　器件制备

以尺寸为 80 μm 的 micro-LED 制备流程为例，在商用蓝宝石衬底上生长的 GaN 蓝光外延片经过标准的半导体工艺后制备得到 micro-LED 阵列。首先在外延片表面沉积 40 nm 的 ITO 作为电流扩展层，而后通过光刻并干法刻蚀至 n-GaN 层，制备尺寸为 80 μm 的台阶；接着通过 PECVD 沉积 300 nm 厚的二氧化硅作为钝化层，并通过光刻、干法刻蚀在钝化层上开孔以沉积金属电极（Ti/Au），从而完成器件制备。其中，外延结构和器件示意图如图 1(a)所示，通过半导体工艺制备流程所制备的器件光学显微镜图如图 1(b)所示。基于 GaN 的多量子阱结构在不同偏置电压下具有发射光子和探测光子的双重功能[16]，因而制备的 micro-LED 阵列中任意一个邻近像素都有望用来作为探测器实时监测发光像素强度的变化，从而实现单片集成发光和实时探测。接着对制备的 micro-LED 进行了基本的光电性能测试，图 1(c)是在驱动电流为 10 mA 时，通过海洋光谱仪（Ocean Optics USB4000）测试尺寸为 80 μm 的 micro-LED 得到的光谱，其峰值波长位于 445 nm。然后利用电流源测试了 micro-LED 的

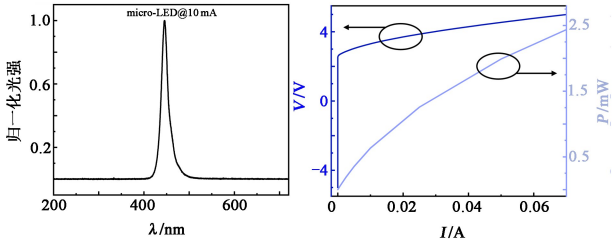
I-V 特性曲线(图 1(d)),其−5 V 偏置电压下的暗电流为 0.02 nA,这意味着其在负偏压下作为探测器时具有更低的本底噪声,有望实现更高的响应度。此外,通过将光功率计贴近器件测试了不同电流下器件的光功率(*P-I*),如图 1(d)所示。同样地,利用上述类似的工艺制备了用于显示应用的 40 μm 的 micro-LED 阵列[22]。



(a) 器件结构图



(b) 制备的 80 μm micro-LED 阵列的光学显微镜图



(c) 驱动电流为 10 mA 时的光谱 (d) *I-V* 和 *P-I* 特性

图 1 器件结构图和制备的 80 μm micro-LED 阵列的光学显微镜图及其特性曲线

1.2 可见光通信系统搭建

为了将器件应用于可见光通信,搭建了 1 m 自由空间信道的通信系统,实验框架如图 2 所示,系统采用 16-QAM OFDM 作为调制方式。在发射端,使用离线的 MATLAB 程序生成 16-QAM OFDM 信号,并将 OFDM 数据传输到任意波形发生器(AWG,Tektronix AWG710B)中生成交流模拟信号。然后经由电子放大器放大并通过偏置器(Bias-tee)与直流源(DC Power)输出的直流信号耦合驱动 micro-LED。Micro-LED 发出的调制光通过发射端透镜准直并通过接收端透镜聚焦到一个高灵敏的硅基雪崩光电二极管(APD,Hamamatsu APD C5658)中。然后,由 APD 将光信号转换成电信号,再由示波器(OSC,Agilent DSA90604A Infiniium)捕捉电信号并转换成数字信号。最后,利用离线的 MATLAB 程序解码,从而获得误码率(BER)、星座图等参数,从而评估发光 micro-LED 的通信性能。此外,阵列中另一个相邻 micro-LED 像素作为探测器在−5 V 偏置下实时监测发光像素的光输出随时间的波动情况,并记录其光电流。

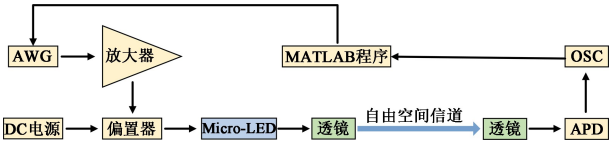


图 2 Micro-LED 光通信系统搭建框图

2 讨论与分析

2.1 实时发光探测性能

正如前文所述,GaN 的多量子阱结构在不同偏置电压下具有发射光子和探测光子的双重功能。对于 LED 发光的功能来说,在一定注入电流下,电子和空穴分别从 n 型层和 p 型层注入 GaN 多量子阱中,受限载流子发生辐射复合而发光。对于探测功能来说,GaN 多量子阱吸收发射的光形成电子-空穴对,从而产生光电流。为了验证 micro-LED 单片集成发光探测的性能,对器件进行进一步测试。Micro-LED 器件经过激光切割后封装在 To-can 上,如图 3 的内嵌图。图 3 绘制了作为探测器的 micro-LED 像素在暗环境中,被另一个工作在不同注入电流下的发光 micro-LED 照射下的 *I-V* 特性曲线。随着发光 micro-LED 的驱动电流从 5 μA 增长到 75 mA,作为探测器的像素在−5 V 的偏置电压下产生的光电流从 4.68×10^{-11} A 增加到 1.35×10^{-6} A,表明作为探测器的像素产生的光电流可以很好地反馈发光像素的光输出变化,从而实现单片发光和实时探测。我们将发光像素在不同驱动电流下的输出光功率以及探测像素对应的光电流绘制在图 4 中,从图中可以看出,发光像素在不同驱动电流下的输出光功率与探测像素产生的光电流一一对应。进一步地,在图 4 的内嵌图中拟合了探测像素

的光电流与发光像素的输出光功率之间的关系，虚线为多项式拟合的光电流和输出光功率关系。可以看到光电流和输出光功率之间呈现非线性曲线关系，这可能是由于发光像素与探测像素之间没有电气隔离。但依据发光像素的输出光功率与探测像素产生的光电流存在一一对应关系，验证了通过测量 micro-LED 作为探测器时产生的光电流，可以监测另一个发光 micro-LED 的光输出变化，从而实现单片发光和实时探测，以满足一些应用中需要稳定光输出的需求。

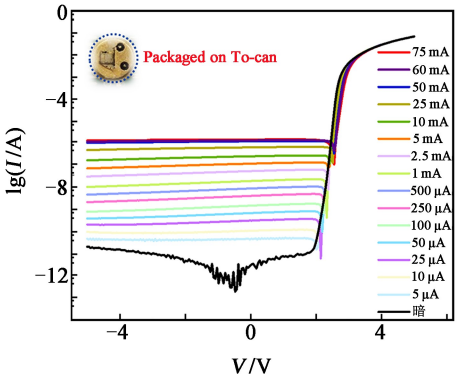


图 3　在不同驱动电流下的发光像素的照射下，探测像素对应的 I-V 特性

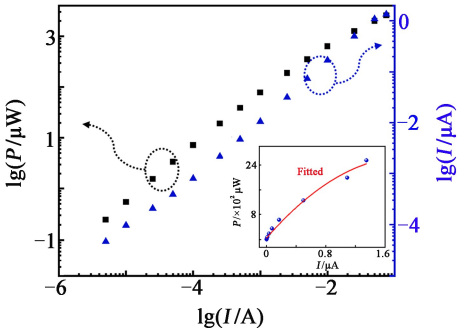


图 4　发光像素在不同驱动电流下的实测光功率以及对应的探测像素产生的光电流

2.2　可见光通信系统中实时发光探测

调制带宽是光通信的基本指标之一，调制带宽测试通过将网络分析仪（VNA，PicoVNA 106）产生的交流扫频信号与直流信号通过 Bias-tee 驱动 micro-LED，然后将光响应通过 APD 反馈到网络分析仪。图 5(a)为该 80 μm micro-LED 在不同驱动电流下的频率响应，可以看出，随着注入电流从 60 mA增加到 75 mA，量子阱内的载流子密度增加，从而降低载流子寿命[23]，调制带宽从 102.57 MHz 增加到 132.51 MHz。通过上述提及的通信系统，在 1 m 自由空间传输距离下，采用 micro-LED 阵列中的一个像素作为发射端，邻近的像素作为实时监测的探测器，测试系统的通信性能。驱动电流和信号峰峰值电压（Peak-to-peak Voltage，V_{pp}）是影响通信系统信噪比的两个重要因素，通过调节驱动电流和 V_{pp} 提高 micro-LED 线性工作区的利用率从而优化通信性能[24]。如图 5(b)和(c)，最低 BER 值所对应的电流值和 V_{pp} 值为所要选取的优化值，优化后的最佳驱动电流为 60 mA，V_{pp} 为 0.4 V。图 5(d)显示了 1 m 自由空间下测得的误码率与数据速率的关系，随着数据速率的增加，实测误码率变差，在前向纠错（Forward Error Correction，FEC）阈值下（3.8×10^{-3}），实现了 1.81 Gb/s 的最大数据速率。图 5(d)内嵌了数据速率为 1.81 Gb/s 的星座图，图 5(e)是截止频率为 472 MHz 的 1.81 Gb/s OFDM 信号的频谱。

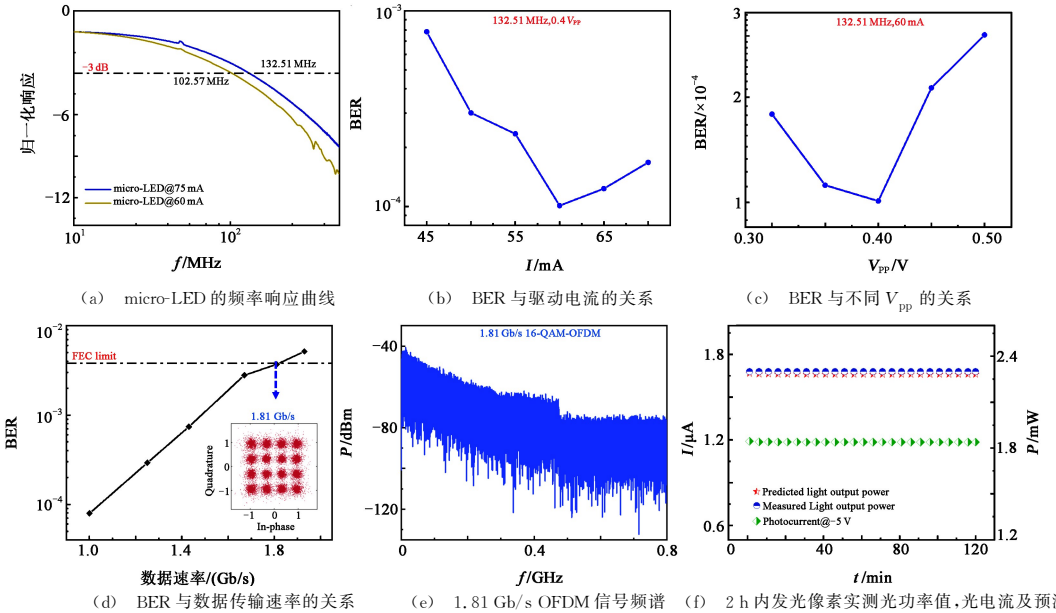
此外，为了进一步验证 micro-LED 阵列实时发光探测的可行性，以直流驱动的发光像素 2 h 发光时间为例，记录 micro-LED 阵列中另一个像素作为探测器实时记录产生的光电流，图 5(f)为 2 h 内发光像素在发射端实测光功率变化与作为探测器的像素产生的光电流的变化。从两个小时的光电流变化可以看出，探测像素可以很好地反馈发光像素的光输出的变化。进一步地，我们根据图 4(b)的内嵌拟合曲线，代入探测器 2 h 内产生的光电流值计算预测的光功率值，可以看到预测的光功率几乎与实际测得到的光功率值吻合，从而验证了该单片发光实时探测器件的可行性，有望实现对光通信系统地实时发光探测。

2.3　显示阵列中坏点定位检测

对于显示而言，micro-LED 在制备过程中容易出现个别芯片损坏的现象。并且，对于实现 micro-LED 量产化应用的关键技术之一——巨量转移技术，其需要进行多次转移，且转移芯片量较大，转移位置精确度要求较高，所以在巨量 micro-LED 转移过程中时常会出现芯片损坏等现象，从而会影响 micro-LED 显示。此外，在 micro-LED 显示屏的使用过程中，由于环境或使用时间增长等原因，micro-LED 显示阵列的某些像素也可能出现老化甚至损坏。因此及时修复显示的不良像素，及时检测 micro-LED 显示阵列坏点的位置就显得尤为重要。目前常用的 LED 检测技术主要是通过电致发光测试，配备高像素相机、显微镜、光谱仪，依次加以电流分析发光情况来检测整个屏幕的坏点[25]。然而，随着市场对于显示质量的要求不断提高，显示像素数量不断增多，像素尺寸不断缩小，对于坏点的及时检测难度逐渐增加，生产成本较高。

因此，有必要发展新的测试方法以提高检测速度和降低成本。

上述实验验证了 GaN 量子阱在不同偏压下可以实现发光和探测的双重功能，并应用于光通信的发光像素实时检测输出光的变化。进一步地，我们制备了尺寸为 40 μm 的显示阵列探索发光探测原理在显示阵列中对于坏点定位检测的应用。以 micro-LED 显示阵列中某一个像素作为探测器，距探测器不同距离的 micro-LED 像素发光，如图 6(a)所示，作为探测器的像素产生的光生电流不同。图 6(b)显示了距探测像素不同距离的发光像素发光时，探测像素产生的光电流，可以看出发光像素距离探测器越远，探测器产生的光电流越小；发光像素距离探测器越近，探测器产生的光电流越大。发光像素和作为探测器的像素之间的距离与探测产生的光电流存在一一对应关系。图 7(a)提取了不同的像素距离与探测器产生的光电流值之间的对应关系，可以看到其中标红的数据点的光电流值与同一距离的另一个像素相差甚远，初步断定该发光像素为不正常的像素。为了进一步确认其对于坏点检测的能力，我们选取了距探测像素 450 μm 的两个发光像素以及距上述探测像素 900 μm 的两个发光像素进行验证。如图 7(a)所示，距探测像素 900 μm 的两个发光像素发光时，探测器在 −5 V 偏置下产生的光电流值分别为 4.8×10^{-9} 和 1.5×10^{-9} A，相差较大。而从图 7(b)测试的两个像素的 *I-V* 特性可以看出，对应光电流值较小的发光像素 *I-V* 曲线不正常且漏电较大。这种坏点产生的原因较为复杂，可能是由于该像素本身存在缺陷，或是该像素在发光过程中由于老化等因素，在器件内部产生缺陷，从而产生过多的非辐射复合影响发光。而距探测像素 450 μm 的两个发光像素发光时，探测器在 −5 V 偏置下产生的光电流分别为 1.1×10^{-8} 和 1.05×10^{-8} A，两个光电流值近乎一致。距探测像素 450 μm 的两个发光像素的 *I-V* 曲线如图 7(c)所示，两个发光像素 *I-V* 曲线几乎吻合。这两种不同情况的结果进一步验证了其检测显示坏点的可行性。

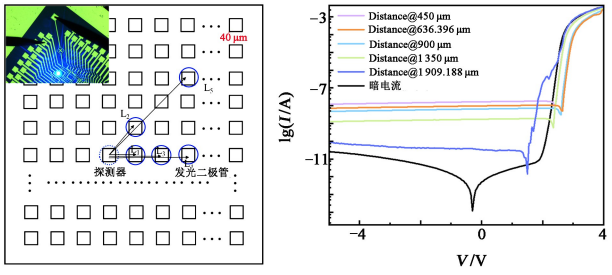


(a) micro-LED 的频率响应曲线　(b) BER 与驱动电流的关系　(c) BER 与不同 V_{pp} 的关系

(d) BER 与数据传输速率的关系　(e) 1.81 Gb/s OFDM 信号频谱　(f) 2 h 内发光像素实测光功率值，光电流及预测光功率值

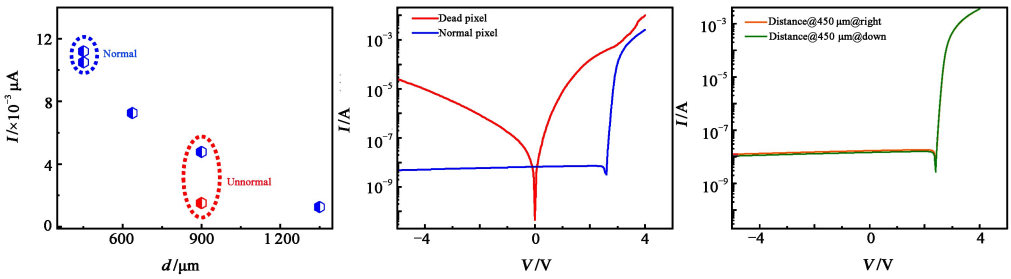
图 5　在不同驱动电流下 micro-LED 的频率响应曲线及各种关系曲线，以及 2 h 内发光像素实测光功率、光电流值和预测光功率

因此，基于 GaN 基量子阱具有吸收光子和发射光子的双重特性，通过在显示阵列中，以某一像素作为探测器，测试距探测像素不同距离的发光像素的发光情况，并通过探测像素产生的光电流大小来确定其是否符合预估范围，从而判断发光 micro-LED 的发光是否正常，同时确定坏点位置。



(a) 显示阵列检测坏点示意图　(b) 探测像素的 *I-V* 曲线

图 6　显示阵列检测坏点示意图及 *I-V* 曲线



（a）　不同距离与其产生的光电流关系　（b）　距探测像素 900 μm　　（c）　距探测像素 450 μm

图 7　不同距离与其产生的光电流关系及距探测像素两个不同距离发光像素的 I-V 特性

3　总结

本文设计并制备了 GaN 蓝光 micro-LED 阵列，基于 InGaN/GaN 多量子阱可以在不同偏压下实现发光和探测的双重功能，进一步验证了蓝光 micro-LED 阵列单片集成发光和实时探测的可行性。同时将 80 μm micro-LED 阵列应用于光通信中，发光像素在 1 m 的自由空间中实现了 1.81 Gb/s 的传输速率，邻近像素作为探测器可以实时监测光通信稳定光输出。此外，利用探测器像素探测到的光电流与不同发光像素的距离之间存在一一对应关系，验证了 40 μm micro-LED 显示阵列可以实现单片坏点的定位检测，进一步拓宽了 micro-LED 多功能阵列的潜在应用范围。

参考文献：

[1] Zhou X, Tian P, Sher C W, et al. Growth, transfer printing and colour conversion techniques towards full-colour micro-LED display[J]. Progress in Quantum Electronics, 2020, 71: 100263.

[2] Zhu S, Chen X, Liu X, et al. Recent progress in and perspectives of underwater wireless optical communication[J]. Progress in Quantum Electronics, 2020, 73: 100274.

[3] Tian Pengfei, Shan Xinyi, Zhu Shijie, et al. AlGaN ultraviolet micro-LEDs[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2022: 10.11091JQE.

[4] Tian P, Liu X, Yi S, et al. High-speed underwater optical wireless communication using a blue GaN-based micro-LED [J]. Opt. Express, 2017, 25(2): 1193-1201.

[5] Meng W, Xu F, Yu Z, et al. Three-dimensional monolithic micro-LED display driven by atomically thin transistor matrix [J]. Nature Nanotechnol., 2021, 16(11): 1231-1236.

[6] Qiu P, Zhu S, Jin Z, et al. Beyond 25 Gbps optical wireless communication using wavelength division multiplexed LEDs and micro-LEDs[J]. Opt. Lett., 2022, 47(2): 317-320.

[7] Zhu S J, Qiu P J, Shan X Y, et al. Micro-LED based double-sided emission display and cross-medium communication[J]. IEEE Photonics J., 2022, 14(3): 7326705.

[8] Zhu S, Qiu P, Qian Z, 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.

[9] Wang Z, Zhu S, Shan X, et al. Full-color micro-LED display based on a single chip with two types of InGaN/GaN MQWs [J]. Opt. Lett., 2021, 46(17): 4358-4361.

[10] Liu X, Lin R, Chen H, et al. High-bandwidth InGaN self-powered detector arrays toward MIMO visible light communication based on micro-LED arrays [J]. ACS Photonics, 2019, 6(12): 3186-3195.

[11] Lin R, Liu X, Zhou G, et al. InGaN micro-LED array enabled advanced underwater wireless optical communication and underwater charging[J]. Adv. Optical Materials, 2021, 9(12): 2002211.

[12] Wang Z, Lin R, Qu D, et al. Ultrafast machine vision with artificial neural network devices based on a GaN-based micro-LED array[J]. Opt. Express, 2021, 29(20): 31963-31973.

[13] Liu A Y, Bowers J. Photonic integration with epitaxial Ⅲ-Ⅴ on silicon[J]. IEEE J. of Sel. Top. Quantum Electron., 2018, 24(6): 1-12.

[14] Li N, Han K, Spratt W, et al. Ultra-low-power sub-photon-voltage high-efficiency light-emitting diodes [J]. Nature Photonics, 2019, 13(9): 588-592.

[15] Li J, Wu J, Chen L, et al. On-chip integration of Ⅲ-nitride flip-chip light-emitting diodes with photodetectors[J]. J. of Lightwave Technol., 2021, 39(8): 2603-2608.

[16] Li K H, Lu H, Fu W Y, et al. Intensity-stabilized LEDs with monolithically integrated photodetectors [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2018, 66(9): 7426-7432.

[17] Tchernycheva M, Messanvi A, de Luna Bugallo A, et al. Integrated photonic platform based on InGaN/GaN nanowire emitters and detectors[J]. Nano Lett., 2014, 14(6): 3515-3520.

[18] Hui R, Taherion S, Wan Y, et al. GaN-based waveguide devices for long-wavelength optical communications [J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 82(9): 1326-1328.

[19] Li K H, Cheung Y F, Jin W, et al. InGaN RGB light-emitting diodes with monolithically integrated photodetectors for stabilizing color chromaticity [J]. IEEE Trans. on

Industrial Electronics, 2019, 67(6): 5154-5160.

[20] Lin P T, Singh V, Lin H Y G, et al. Low-stress silicon nitride platform for mid-infrared broadband and monolithically integrated microphotonics[J]. Adv. Optical Materials, 2013, 1(10): 732-739.

[21] Liu C, Cai Y, Jiang H, et al. Monolithic integration of Ⅲ-nitride voltage-controlled light emitters with dual-wavelength photodiodes by selective-area epitaxy[J]. Opt. Lett., 2018, 43(14): 3401-3404.

[22] Zhou G, Lin R, Qian Z, et al. GaN-based micro-LEDs and detectors defined by current spreading layer: size-dependent characteristics and their multifunctional applications[J]. J. of Phys. D: Appl. Phys., 2021, 54(33): 335104.

[23] Huang Y, Guo Z, Huang H, et al. Influence of current density and capacitance on the bandwidth of VLC LED[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2018, 30(9): 773-776.

[24] Islim M S, Ferreira R X, He X, et al. Towards 10 Gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a GaN violet micro-LED[J]. Photonics Research, 2017, 5(2): A35-A43.

[25] Zheng L, Guo Z, Yan W, et al. Research on a camera-based microscopic imaging system to inspect the surface luminance of the micro-LED array[J]. IEEE Access, 2018, 6: 51329-51336.

作者简介：

单心怡(1997—)，女，江苏省盐城市人，博士研究生，主要研究方向为 GaN 基 micro-LED 与低维材料集成及应用；

田朋飞(1986—)，男，河南省南阳市人，博士，副教授，博士生导师，2007 至今从事 micro-LED 显示、micro-LED 光通信等方向的研究；主持国家重点研发计划国际合作项目、国家自然科学基金项目等，发表 SCI 论文 70 余篇，授权发明专利 10 余项。