

硅基 InGaN/GaN 多量子阱微盘器件的发光、探测和数据传输

秦飞飞^{1*}, 卢雪瑶¹, 王潇璇², 吴佳启¹, 曹越¹, 张蕾¹, 樊雪峰¹,
朱刚毅^{1*}, 王永进¹

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

2. 东南大学 生物科学与医学工程学院, 江苏 南京 210008)

摘要: 光源和探测器的集成可有效促进轻量化和小型化光电系统的发展, InGaN/GaN 多量子阱器件中发光与探测共存现象为收发一体芯片的设计提供了可能。本论文采用标准半导体工艺制备了硅片上集成的圆盘形 InGaN/GaN 多量子阱阵列器件, 并对其发光、探测以及基本通信特性进行了研究。微盘型器件中的共振模式有助于提升其探测特性, 同时各向同性的辐射特性, 有助于器件作为光源时与探测器在空间的上的耦合。作为光源, 该器件的开启电压为 2.5 V, 中心波长 455 nm, -3dB 带宽为 5.4 MHz。作为探测器, 该器件对紫外到蓝光波段的光有响应, 探测性能随波长增加而减弱, 截止波长 450 nm。在 365 nm 光源激发下, 该器件具有最高 7.2×10^4 的开关比, 下降沿时间为 0.41 ms。同时, 基于单个微盘器件, 本文构建并演示了半双工通信系统, 在不同频段实现数据传输。这项研究对于电驱动光源制备以及收发一体的光通信具有重要意义。

关键词: 硅基 InGaN/GaN; 多量子阱器件; 发光与探测; 半双工通信

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240064

Light Emission, Detection and Data Transmission in Silicon-based InGaN/GaN Multi-quantum Well Microdisk Device

QIN Feifei^{1*}, LU Xueyao¹, WANG Xiaoxuan², WU Jiaqi¹, CAO Yue¹, ZHANG Lei¹,
FAN Xuefeng¹, ZHU Gangyi^{1*}, WANG Yongjin¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. School of Biological Science and Medical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

* Corresponding Authors, E-mail: qinfeifei@njupt.edu.cn; zhugangyi@njupt.edu.cn

Abstract: The integration of light source and detector can effectively promote the development of lightweight and miniaturized photoelectricity systems. The coexistence of emission and detection in InGaN/GaN multi-quantum well (MQW) light emitting diode devices provides a possibility for the design of transceiver integrated devices. In this paper, InGaN/GaN MQW microdisk array integrated on silicon wafers were fabricated using standard semiconductor processes, and their emission, detection, and basic communication characteristics were studied. The resonance mode in the microdisk device helps to improve its detection characteristics, while the isotropic radiation characteristics help the device as a light source and the detector in space coupling. As a light source, the device operates at 2.5 V with an emission wavelength at 455 nm and a -3dB bandwidth reaching 5.4 MHz. As a detector, the device is responsive to light in the ultraviolet to blue band, and the detection performance decreases with increasing wavelength with a cutoff wavelength of 450 nm. Under excitation at 365 nm, the device exhibits a switch ratio of 7.2×10^4 with a fall time as short as 0.41 ms. Additionally, we constructed and demonstrated a half-duplex communication system

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20210593), 国家自然科学基金青年基金项目(62204127)

Supported by Natural Science Youth Foundation of Jiangsu Province (BK20210593); National Natural Science Foundation of China (62204127)

based on a single device that achieved data transmission in different frequency bands. This research is of great significance for the preparation of electrically driven light source and the optical communication of transceiver integration.

Key words: silicon-based InGaN/GaN; multiple quantum well devices; luminescence and detection; half-duplex communication

1 引 言

随着科技的飞速发展,第三代半导体材料及其器件在发光、探测和数据传输等领域的应用日益广泛^[1,2]。硅基 GaN 材料可以弥补传统硅基芯片间接带隙、发光性能差的缺点,同时兼容现有硅工艺,为大面积、发光可控的芯片制备提供了可能。目前高性能 GaN 发光二极管(LED)和探测器依旧依赖蓝宝石或自支撑衬底。随着材料生长技术的进步,硅基 GaN 外延片层错密度高、缺陷密度大,应力残余大等缺点被逐渐克服。在硅上直接生长的氮化物半导体发光和激光二极管成为潜在的片上光源^[3,4]。此外,多量子阱(MQW)结构赋予了器件能带可编辑的特性^[5,6],硅基 GaN 多量子阱二极管可以集成光学发射、传输、调制和检测等多种功能。更有意义的是,由于存在发射探测光谱重叠区域,多量子阱二极管可以吸收具有相同 MQW 结构的另一个二极管发出的光,使它们能够在发射器和接收器之间切换角色,这赋予传感器和通信器件更多的设计空间和自由度^[7]。

一方面,硅基 GaN 多量子阱发光二极管器件作为光源具有显著的优势^[8]。通过精确控制多量子阱的结构和组分,可以实现在可见光至近红外波段的高效发光^[9-11]。与传统的发光器件相比,此类器件具有更高的发光效率、更长的使用寿命和更好的稳定性,有望在显示领域实现革命性的突破。例如,Höpfner Jakob 等制备了中心波长在 310 nm 的 InAlGaIn 多量子阱深紫外发光二极管^[12]。研究了器件在 20 ~ 340 K 的温度范围内长时间工作的光谱和量子效率。实验表明,器件工作 1000 小时后的光谱和效率变化量均小于 1%。另一方面,硅基多量子阱探测器具有高灵敏度、快速响应等特点^[13,14],使其适合做探测器。发光与探测共存现象^[15-17],可以保证单片集成后光源和探测器之间的信号切换与传输。蓝宝石基的器件也可以实现该功能,但是串扰较严重。如我们前期研究显示,在 1×1mm 的 InGaIn/GaN 多量子阱阵列单元构成的液体浓度传感器中,传感单元间距

4.5 mm 处的串扰信号强度依旧与传感信号在同一个量级^[18]。相较于蓝宝石衬底,可见光在硅中的传输特性较差。片上集成后,硅基器件有串扰低的天然优势,有利于对微弱光信号的高效探测和精准测量^[19,20]。例如,Q. Lyu 等实现了紫外发光二极管和光电探测器在 p-GaN/AlGaIn/GaN/Si 平台上的单片集成,演示了低速情况下的数据传输^[21]。N. Chi 等利用阵列化的硅基 InGaIn/GaN 多量子阱器件做通信接收端,实现了 10 Gbps 的可见光通信^[22]。

本文制备了硅基 InGaIn/GaN 多量子阱微盘器件阵列,并对其发光、探测以及基本通信特性进行了研究。结合单个器件中发光、探测功能的复用特性,搭建了基于半双工通信系统,演示了不同频段(发送 1 kbps,接收 10 bps)的数据传输。本文旨在通过对硅基 InGaIn/GaN 多量子阱微盘器件光电特性的深入研究和分析,为相关领域的科技发展提供有益的参考和借鉴,推动该器件在实际应用中的广泛推广和使用。

2 实 验

2.1 样品制备

本文采用金属有机气相外延法(MOVPE)制备的 Si 基 GaIn 作为基础材料制备硅基 InGaIn/GaN 多量子阱微盘^[23]。外延片自下而上依次为 Si 衬底层(1500 μm), AlN/AlGaIn/GaN 缓冲层(1.5 μm), n-GaN 层(2.8 μm), InGaIn/GaN 多量子阱层(0.35 μm)和 p-GaN 层(0.4 μm)。图 1 展示了器件的制备过程。首先采用光刻胶作掩膜,通过电感耦合等离子体(ICP)刻蚀外延片至 n-GaN 层(步骤 a-b)构建圆盘形 p 型区,用丙酮溶液去除残余的光刻胶。利用套刻工艺,将光刻胶定义出 n 型区,再次通过 ICP 刻蚀将 n-GaN 材料刻蚀至 Si 层,构成圆盘形 pn 结结构(步骤 b-c)。利用套刻工艺将旋涂在 p-GaN 层和 n-GaN 层上表面的一层光刻胶分别定义出 p 型区电极图形和 n 型区电极图形。通过电子束蒸镀在 p-GaN 和 n-GaN 层上镀上金电极(步骤 c-d),最后用丙酮溶液去除残余的光刻胶。

最终制备出 Si 衬底上的圆盘形发光二极管阵列。

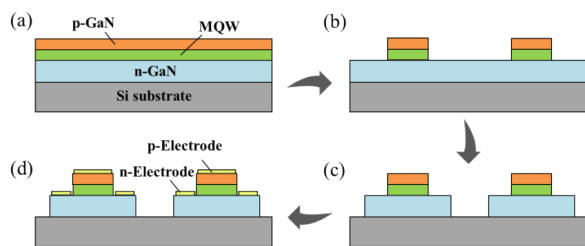


图1 Si基 GaN 多量子阱微盘器件制备流程图:(a)硅基 GaN 外延片;(b)通过光刻和 ICP 刻蚀出 p-GaN 结构;(c)通过光刻和 ICP 刻蚀出 pn 结结构;(d)通过光刻和电子束蒸镀制备金电极

Fig.1 Fabrication diagram of Si-based GaN microdisk MQW device: (a) The basic material of GaN epitaxial wafer; (b) p-GaN structures were obtained by photolithography and ICP; (c) The pn junction structure was obtained by photolithography and ICP; (d) Gold electrode was prepared by photolithography and electron beam evaporation

2.2 样品表征

采用场发射扫描电镜(SEM, SU8010),粉末 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D8),X 射线光电子能谱(XPS, Escalab 250Xi)对器件形象形貌和结构进行表征。采用微区光谱测试系统测试了样品的光致发光(PL),电致发光(EL)和拉曼(HORIBA, LabSpec6)。PL 激发波长为 355 nm 纳秒激光,EL 驱动为源表(Keysight, B2901),拉曼激发波长 532 nm 连续激光器。采用自搭建的电学特性测试设备配合源表、精密阻抗分析仪(TH2840B),连续谱光源(Energetiq, EQ99X)、单色仪,示波器(TDS3052B)、大功率发光二极管光源和信号发生器对器件的探测特性进行研究。采用网分仪(Keysight, E5080A)和滨松探测器(APD, Hamamatsu C12702),光电倍增管(PMT, CH253)配合 375 nm 激光器、对器件的发送和接收带宽进行测量。

3 结果与讨论

图 2 展示了器件的基本形貌和光谱表征结果,从图 2(a)中可以看出,所制备的 Si 基 GaN 多量子阱微盘器件具有良好的圆形结构,且阵列化排布。图 2(b)中展示了单个器件的俯视图,圆盘外圈光滑并且电极状态良好。内圆(p 型层)直径为 190 μm ,在 p 和 n 电极中间有 10 μm 的间距用

以防止器件短路,外圆(n 型层)直径为 400 μm 。图 2(c)展示了单个器件的电极放大图,器件呈现出明显的内 p 外 n 型结构。p 电极与 n 电极之间有明显的台阶结构。相较于其它的结构,圆盘形发光和探测器件具有天然的优势,一方面,各向同性的光辐射特性有利于增大光源中辐射光子到达探测器的概率,提升传感器信号强度^[24]。另一方面,微腔中的光学共振模式有利于提升器件的光限域能力,优化探测器特性^[25]。

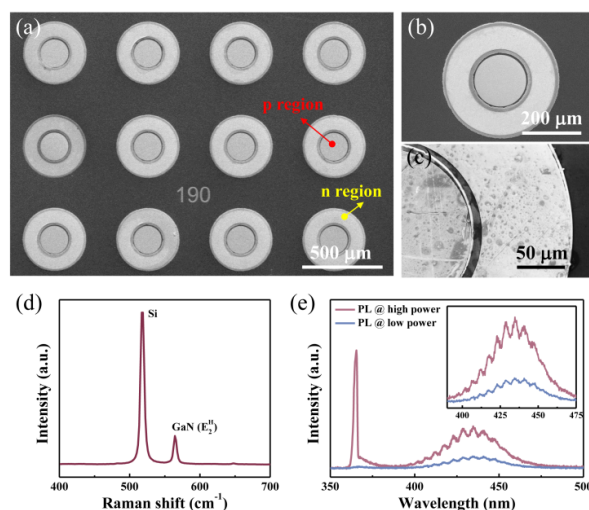


图 2(a) -(c)Si 基 GaN 多量子阱微盘器件的俯视 SEM 图像;Si 基 GaN 多量子阱微盘器件的 (d)拉曼光谱和(e)光致发光谱

Fig. 2 (a)-(c) Top view SEM image of Si-based GaN microdisk MQW device; (d) Raman spectroscopy and (e) photoluminescence spectra of Si-based GaN microdisk multi-quantum well device

图 2(d)展示了器件中心位置(p 型区域)的拉曼光谱。从中可以观测到 520 cm^{-1} 位置的 Si 的特征峰,在 567 cm^{-1} 位置观测到 GaN 的 E_2^H 模式对应的特征峰^[26],该表征确认了硅基 GaN 材料。该位置在 355 nm 纳秒激光泵浦下的光谱如图 2(e)所示,高功率下器件中出现属于本征 GaN 的光谱,中心波长在 365 nm。低功率下,器件呈现出 400-500 nm 范围内的宽谱发光,属于量子阱层发光。图 2(e)中的插图显示,在 400-500 nm 期间范围内出现明显的周期共振模式,模式间距约为 6 nm。考虑到微腔尺寸和外延片结构,该振荡模式为外延片上下表面的法布里-珀罗谐振腔(F-P)共振。

如图 3(a)所示,器件的伏安特性曲线具有明显的整流特性,开启电压在 2.3 V。器件的 EL 光谱

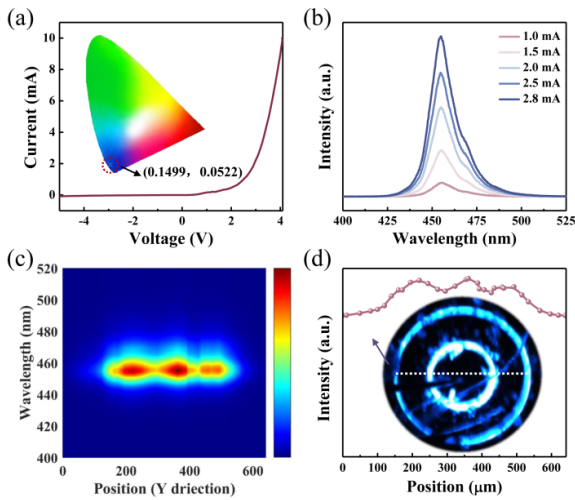


图3 Si基 GaN 多量子阱微盘器件的发光特性:(a)I-V 特性曲线和色度图;(b)不同驱动电流下的 EL 谱;(c)位置相关发光特性;(d)位置相关的峰值光谱强度统计,插图为样品的发光照片

Fig. 3 Light emission properties of Si-based GaN microdisk MQW device: (a) I-V characteristic curve and chromaticity chart; (b) EL spectra at different driving currents; (c) Position-related EL spectra; (d) Position-related peak intensity summary, the inset shows the CCD images

如图 3(b)所示,光谱的峰值波长为 455 nm,半高宽(FWHM)为 16 nm,并且发光强度随驱动电流的增加而增加。对比图 2(e)中的光泵浦结果,该光谱红移了大约 10 nm,来自于 InGaN/GaN 量子阱层。值得注意的是,相较于光泵浦,由于电注入的能量较低,量子阱对电子的束缚能力更强,所以,电致发光光谱更贴近量子阱的能级。光谱与图 3(a)中插图中显示的色度图(CIE 1931)一致,对应色度坐标为(0.1499,0.0522)。固定驱动电流,图 3(c)展示了单个器件位置相关的 EL 光谱,EL 强度在整个区域内是对称分布的,并且中间大两边小,符合内 p 外 n 型器件的发光特性。参照其发光照片,将图 3(c)中峰值波长对应的光谱强度做归纳得到图 3(d)。可以看出该器件在水平方向上具有三个发光亮度峰值,分别对应于圆盘器件的左外环、中间以及右外环,说明器件在 p 型区发光最强,并通过微盘的侧壁辐射到空间中。

为了研究器件的探测特性,采用各个波段的二极管光源结合源表测试了器件的明暗电流。图 4(a)中的响应度曲线显示,探测器在 350-450 nm 范围内有光响应,随着波长的增加,响应度减弱。图 4(b)中展示了单个器件作为探测器时在不同

光照条件下的 IV 曲线。从图中可以看出,器件的暗电流在 nA 级,且器件对 460 nm 的光几乎无响应。在 405 nm 和 365 nm 光照下,器件呈现出明显的自驱动特性。器件对 365 nm 的光响应最大,在 -2V 偏压下光电流水平达到了 0.2 μA 。

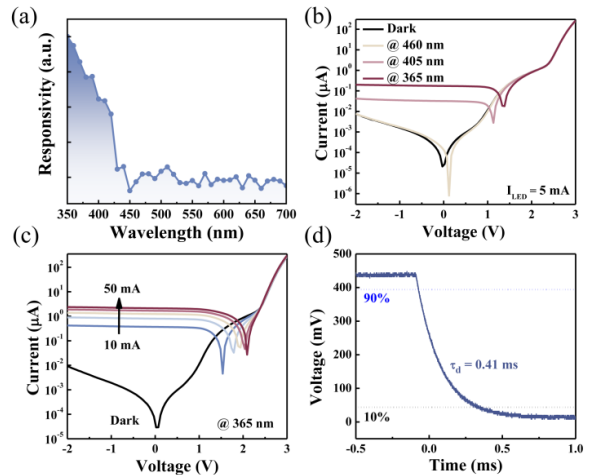


图4 Si基 GaN 多量子阱微盘器件的探测特性:(a)响应度曲线;(b)不同波长光照下的伏安特性曲线(对数坐标),(c)365 nm 波长光照下不同驱动电流下的 I-V 曲线(对数坐标);(d)瞬态光电响应曲线

Fig. 4 Detection characteristics of Si-based GaN microdisk MQW device: (a) Responsiveness curve; (b) I-V curves under different pumping wavelength in log-scale; (c) I-V curves of sample under 365 nm light source with different driving currents in log-scale; (d) Transient photoelectric response curve

采用 365 nm 发光二极管作为光源进一步探索其探测器性能。改变 365 nm 发光二极管的驱动电流以改变光照强度,图 4(c)给出了不同光强照射下探测器的伏安特性曲线。随着偏置电压的增加,器件的暗电流增加。该现象与器件的时间电流曲线结果一致(见支持文件中图 S1)。定义无光照下探测器的电流为暗电流(I_{dark}),在光照情况下的电流为光电流(I_{light}),器件的明暗电流比为 $I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$ 。在 0 V 偏压下,器件的光暗电流比达到 7.2×10^4 。随着光照强度的增加,器件表现出越来越高的光电流水平。但是增幅并不明显,说明偏置电压对光电流的影响不大。图 4(d)的瞬态光响应表明器件具有快速的恢复能力,下降沿(定义为光电流变化从最大值的 90% 到 10% 所需的时间)为 0.41 ms。

为了研究器件的通信特性,基于 OOK(On-Off Keying)调制,我们测试了单个 Si 基 GaN 多量

子阱微盘器件的-3dB带宽和数据传输特性^[27]。如图5(a)所示,器件作为光源在2.7 V偏压下的-3dB发送带宽为5.7 MHz,2.5 V下的带宽略大于5.7 MHz,该现象与器件中阻抗特性有关(见支持文件中图S2)。器件的阻抗测试显示,高电压下器件电容较大,所以通信带宽有所降低。采用R. Wang

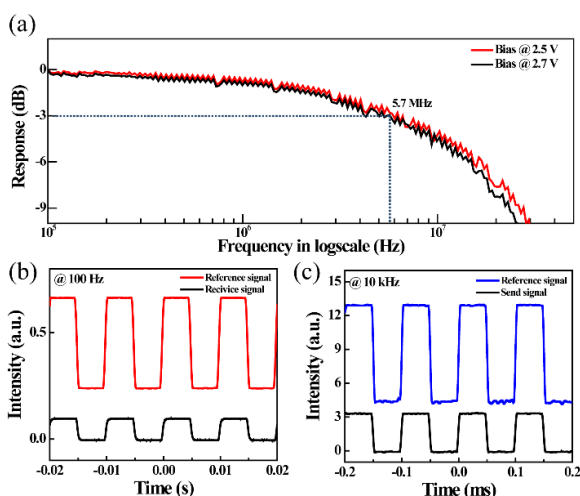


图5 Si基Ga_N多量子阱微盘器件的通信特性:(a)在不同偏压下的-3dB带宽;(b)作为接收端的接收波形与参考波形;(c)作为发送端的发射波形与参考波形

Fig. 5 Optical communication properties of Si-based GaN microdisk MQW device: (a) -3dB bandwidth at different bias voltages; (b) the received waveform and the reference waveform of the device as receiver, (c) the send waveform and the reference waveform of the device as emitter

等的方法^[28],器件作为探测器在0 V偏压下的-3dB带宽为1.1 kHz(见支持文件S3)。图5(b)显示了器件作为接收端的接收波形图以及参考波形,频率为100 Hz。图5(c)显示了器件作为发送端时的发送波形图以及参考波形,频率为10 kHz。图5中的结果显示,低速条件下器件具备收发一体特性。

为了进一步展示器件的通信性能,本文搭建了一个半双工通信系统(元器件列表见支持文件中表S1)。如图6(a)所示,系统左端使用单个Si基Ga_N多量子阱微盘器件实现收发一体,用单片机控制的低压小型继电器开关做收发信号的切换。系统右端使用365 nm的商业发光二极管作为发射器,使用PMT作为接收器。为了减少系统右端在发射信号时自身对PMT接收端的串扰,在PMT的前端加入遮光板。为了提升Si基Ga_N多量子阱微盘器件的信号强度,在系统中引入跨阻放大器和低通滤波器。系统将信号转换为ASCII码再以二进制码形式传输,采用不同的传输速率区分器件的工作状态,采用示波器记录整个通信过程。如图6(b)所示,作为发射端,器件以1 kbps的速率发送数据到右侧PMT。作为接收端,器件接收右侧365 nm发光二极管以10 bps速率传输的信号。图6(c)显示了Si基Ga_N多量子阱微盘器件接收到的具体信息,解码之后为“2024”。图6(d)显示了PMT接收到的具体信息,选择合适的阈值电压解码之后为“njupt”。

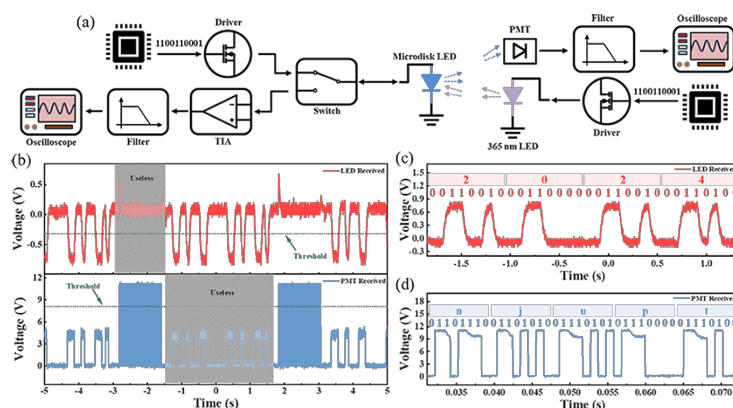


图6 基于Si基Ga_N多量子阱微盘器件的半双工通信系统:(a)半双工通信系统原理图;(b)收发双方相互通信的实时波形图;(c)Ga_N器件接收到的波形信息及解码内容;(d)PMT接收到的波形信息及解码内容

Fig.6 The half duplex communication system based on Si-based GaN MQW microdisk device: (a) Half duplex communication system schematic; (b) Real-time waveform diagram of the communication between the emitter and the receiver; (c) Waveform information received by GaN device and decoding content; (d) Waveform information received by PMT and decoding content

4 结 论

综上所述,我们通过光刻和ICP刻蚀工艺制备了发光中心波长在455 nm附近的硅基InGaN/GaN多量子阱圆盘发光二极管。对器件的发光和探测特性进行了研究。测量了器件的PL谱、EL谱、响应度曲线、下降沿以及-3dB带宽,并搭建了基于空间可见光的半双工通信系统用于验证器件的通信性能。结果表明,作为光源,该器件的开启

电压、中心波长和-3dB带宽分别为2.5 V、455 nm、5.4 MHz;作为探测器,器件截止波长为450 nm。365 nm光照射下该器件具有 7.2×10^4 的开关比,下降沿时间为0.41 ms,接收-3dB带宽为1.1 kHz。微盘发光二极管的发光探测共存现象使得单个器件集成收发一体通信成为可能。本研究对于电驱动光源制备以及实现通信波段工作的片上集成光源具有重要的意义。

参 考 文 献:

- [1] ZOU K, ZHANG Z, LIAO P, *et al.* Higher-order QAM data transmission using a high-coherence hybrid Si/III - V semiconductor laser [J]. *Opt. Lett.*, 2020, 45(6): 1499-1502.
- [2] T-YPARK, WANG Y, ALKHAZRAGI O, *et al.* 2-Gb/s ultraviolet-light optical wireless communication by InGaN/GaN multi-quantum well dual-function micro-photodetector [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(6).
- [3] SELLES J, BRIMONT C, CASSABOIS G, *et al.* Deep-UV nitride-on-silicon microdisk lasers [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6(21650).
- [4] FENG M, LIU J, SUN Q, *et al.* III-nitride semiconductor lasers grown on Si [J]. *Prog. Quantum Electron.*, 2021, 77(100323).
- [5] ZHU C, XU C, FENG P, *et al.* A comparison study of InGaN/GaN multiple quantum wells grown on (111) silicon and (0001) sapphire substrates under identical conditions [J]. *J Phys. D Appl. Phys.*, 2022, 55(44): 444003.
- [6] LEE M, SHIN Y, LEE H U, *et al.* Origin of high quantum efficiency in Si-based homoepitaxial InGaN/GaN light-emitting diodes [J]. *J Phys. D Appl. Phys.*, 2020, 53(37): 375102.
- [7] FU J, FU K, YE Z, *et al.* Multichannel visible light communication over a single optical path [J]. *ACS Photonics*, 2023, 11(1): 139-148.
- [8] IYER P P, DECRESCENT R A, MOHTASHAMI Y, *et al.* Unidirectional luminescence from InGaN/GaN quantum-well metasurfaces [J]. *Nat. Photonics*, 2020, 14(9): 543-548.
- [9] NGUYEN H P T, CUI K, ZHANG S, *et al.* Full-color InGaN/GaN dot-in-a-wire light emitting diodes on silicon [J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(44): 445202.
- [10] ZHAO J, CHEN K, GONG M, *et al.* Epitaxial growth and characteristics of nonpolar a-plane InGaN films with blue-green-red emission and entire in content range [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2022, 39(4): 048101.
- [11] LIU B, LUO W, ZHANG R, *et al.* Growth of in-rich and Ga-rich InGaN alloys by MOCVD and fabrication of InGaN-based photoelectrodes [J]. *Phys. Status Solidi (c)*, 2010, 7(7-8): 1817-1820.
- [12] HÖPFNER J, GUPTA P, GUTTMANN M, *et al.* Temperature-dependent electroluminescence of stressed and unstressed InAlGaIn multi-quantum well UVB leds [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 122(15).
- [13] CHAI J, KONG D, CHEN S, *et al.* High responsivity and high speed InGaN-based blue-light photodetectors on Si substrates [J]. *RSC Adv.*, 2021, 11(40): 25079-25083.
- [14] PEREIRO J, RIVERA C, NAVARRO A, *et al.* Optimization of InGaN - GaN MQW Photodetector Structures for High-Responsivity Performance [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2009, 45(6): 617-622.
- [15] HAGGAR J I, CAI Y, BAI J, *et al.* Long-wavelength semipolar (11 - 22) InGaN/GaN leds with multi-Gb/s data transmission rates for VLC [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2021, 3(9): 4236-4242.
- [16] FU K, GAO X, YE Z, *et al.* Coexistence of light emission and detection in a III-nitride quantum well diode [J]. *Opt. Lett.*, 2022, 47(11): 2614-2617.
- [17] WANG Y, XU Y, YANG Y, *et al.* Simultaneous light emission and detection of InGaN/GaN multiple quantum well diodes for in-plane visible light communication [J]. *Opt. Commun.*, 2017, 387(440-445).
- [18] QIN F, LU X, GHEN Y, *et al.* Realized concentration sensing system with monolithic InGaN/GaN photonic chips [J].

- Chin Opt. Lett.*, 2024, 22(6):062501-062507
- [19] WANG F, LIU S, SHU L, *et al.* Low-dimensional carbon based sensors and sensing network for wearable health and environmental monitoring [J]. *Carbon*, 2017, 121:353-367.
- [20] XU Y, HU X, KUNDU S, *et al.* Silicon-based sensors for biomedical applications: A review [J]. *Sensors-Basel*, 2019, 19(13): 2908.
- [21] LYU Q, JIANG H, LAU K M. Monolithic integration of ultraviolet light emitting diodes and photodetectors on a p-GaN/AlGaIn/GaN/Si platform [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(6): 8358-8364.
- [22] SHI J, XU Z, NIU W, *et al.* Si-substrate vertical-structure InGaIn/GaN micro-led-based photodetector for beyond 10 gbps visible light communication [J]. *Photonics Res.*, 2022, 10(10): 2394.
- [23] DETCHPROHM T, HIRAMATSU K, SAWAKI N, *et al.* The homoepitaxy of GaN by metalorganic vapor phase epitaxy using GaN substrates [J]. *J. Cryst. Growth*, 1994, 137(1-2): 170-174.
- [24] ZHU H, YU H, ZHANG J, *et al.* Organic photoplethysmography sensor based on directional emission microcavity organic light-emitting device [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, 2400042.
- [25] CANEDY C L, BEWLEY W W, MERRITT C D, *et al.* Resonant-cavity infrared detector with five-quantum-well absorber and 34% external quantum efficiency at 4 μm [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(3): 3771-3781.
- [26] CHOI H, HUI K, LAI P, *et al.* Lasing in GaN microdisks pivoted on Si [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(21):211101.
- [27] SHAN X, ZHU S, LIN R, *et al.* Improvements of the modulation bandwidth and data rate of green-emitting cspbbr 3 perovskite quantum dots for Gbps visible light communication [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(2): 2195-2207.
- [28] XIAO X, TANG H, ZHANG T, *et al.* Improving the modulation bandwidth of led by CdSe/ZnS quantum dots for visible light communication [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(19): 21577-21586.



秦飞飞(1987—),男,江苏连云港人,博士研究生,讲师,2019年于东南大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体微腔发光器件的研究。