

文章编号: 1000-7032(2024)06-0978-08

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,
樊学峰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 210096)

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, -3 dB 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, 该器件具有最高开关比 7.2×10^4 , 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 -3 dB 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.

收稿日期: 2024-03-13; 修订日期: 2024-03-26

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(62204127)

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

Additionally, we constructed and demonstrated a half-duplex communication system 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,这赋予了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,该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1 000 h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 mm×1 mm的InGaIn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,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]。Chi等利用阵列化的硅基InGaIn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GaN作为基础材料制备硅基InGaIn多量子阱微盘^[23]。外延片自下而上依次为Si衬底层(1 500 μm)、AlN/AlGaIn/GaN缓冲层(1.5 μm)、n-GaN层(2.8 μm)、InGaIn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,使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。

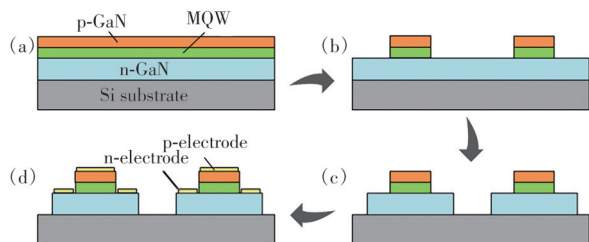


图 1 Si 基 GaN 多量子阱微盘器件制备流程图。(a) 硅基 GaN 外延片;(b) 通过光刻和 ICP 刻蚀出 p-GaN 结构;(c) 通过光刻和 ICP 刻蚀出 pn 结结构;(d) 通过光刻和电子束蒸镀制备金电极

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) 和拉曼光谱 (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

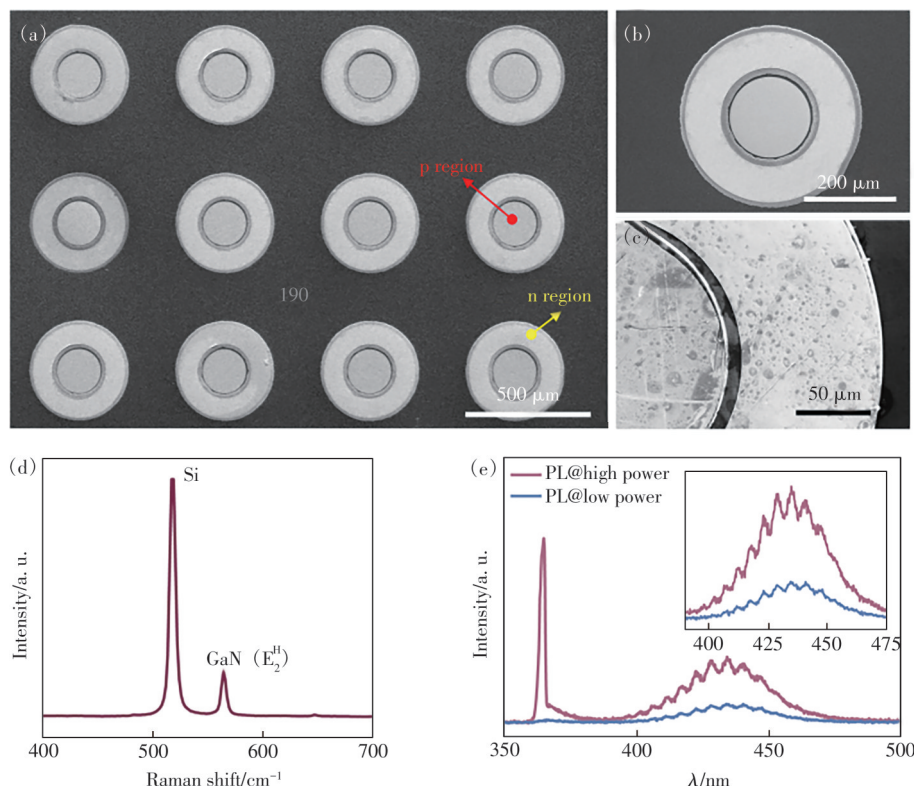


图 2 (a)~(c) Si 基 GaN 多量子阱微盘器件的俯视 SEM 图像; Si 基 GaN 多量子阱微盘器件的拉曼光谱 (d) 和光致发光谱 (e)

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

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电极和n电极中间有10 μm 的间距用于防止器件短路,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。相较于其他的结构,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(d)展示了器件中心位置(p型区域)的拉曼光谱。从图中可以观测到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)中插图显示,在400~500 nm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2.5 V。器件的EL光谱如图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大。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)插图中显示的色度图(CIE 1931)一致,对应色度坐标为(0.149 9, 0.052 2)。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

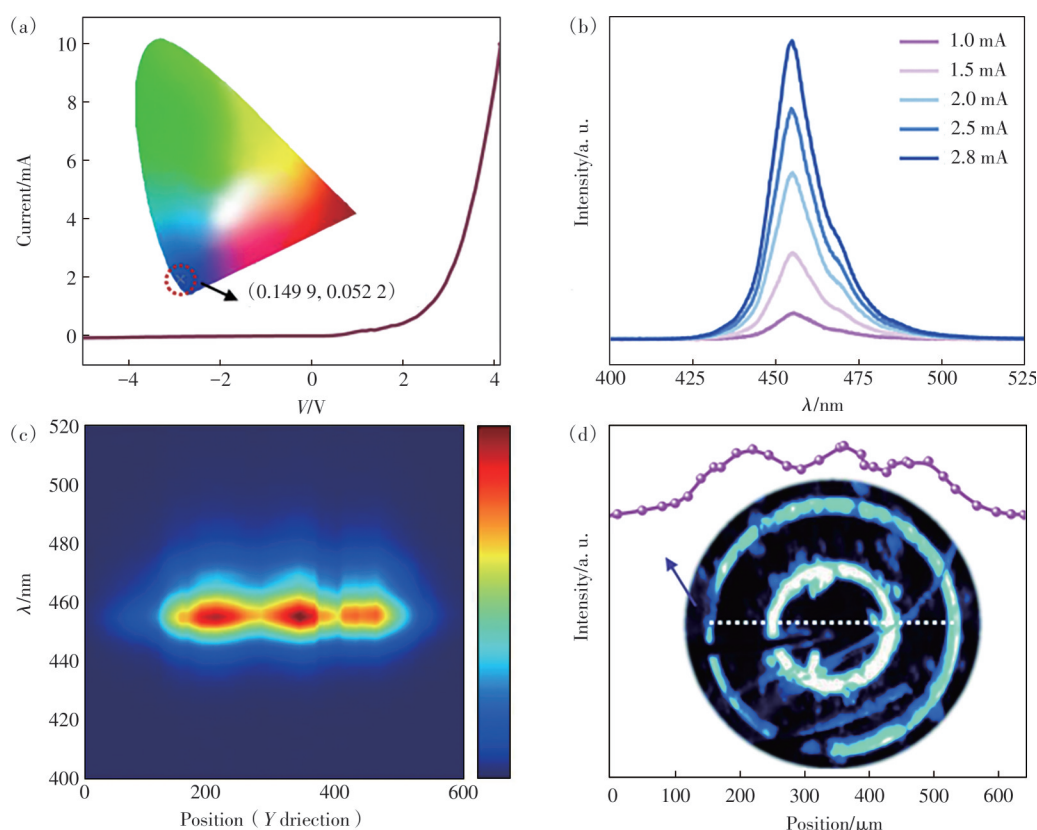


图3 Si基GaN多量子阱微盘器件的发光特性。(a) I - V 特性曲线和色度图;(b)不同驱动电流下的EL谱;(c)位置相关发光特性;(d)位置相关的峰值光谱强度统计,插图为样品的发光照片

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

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 I - V 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 -2 V 偏压下光电流水平达到了 0.2 μ A。

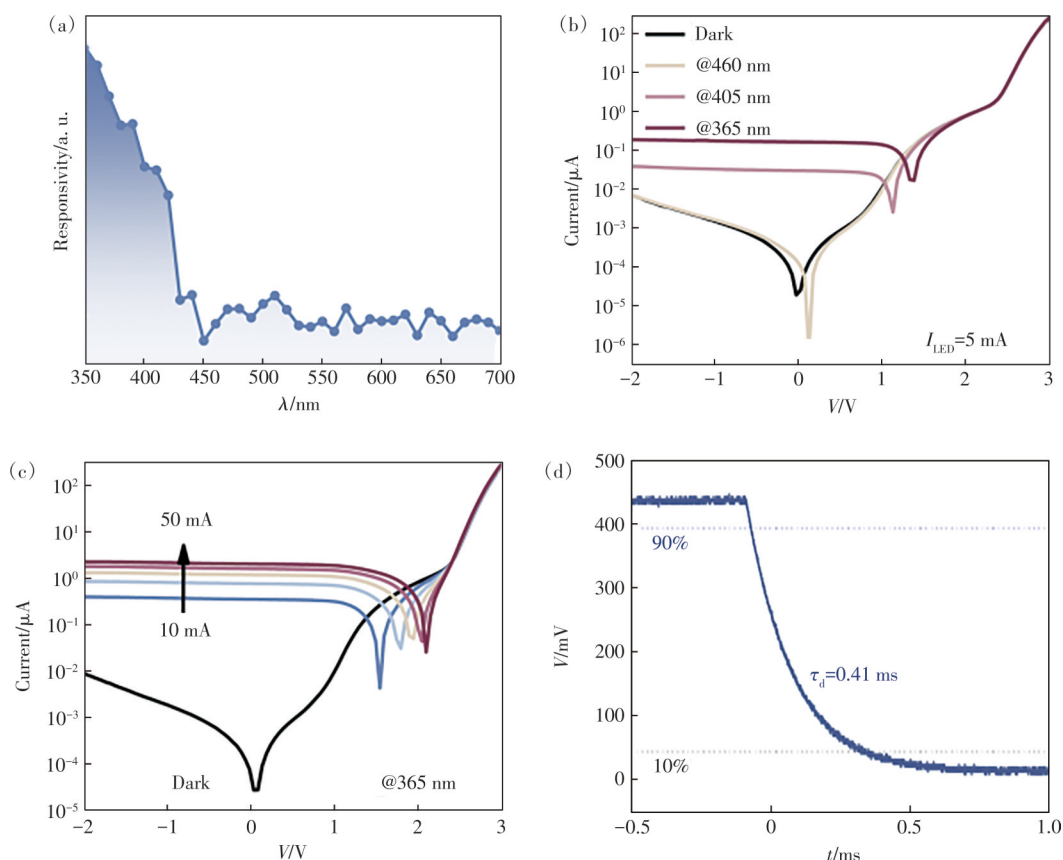


图 4 Si 基 GaN 多量子阱微盘器件的探测特性。(a)响应度曲线;(b)不同波长光照下的伏安特性曲线(对数坐标),(c)365 nm 波长光照下不同驱动电流下的 I - V 曲线(对数坐标);(d)瞬态光电响应曲线

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(见补充文件图 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 -3 dB 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-3 dB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(见补充文件图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Wang 等的方法^[28],器件作为探测器在0 V偏

压下的-3 dB带宽为1.1 kHz(见补充文件图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。

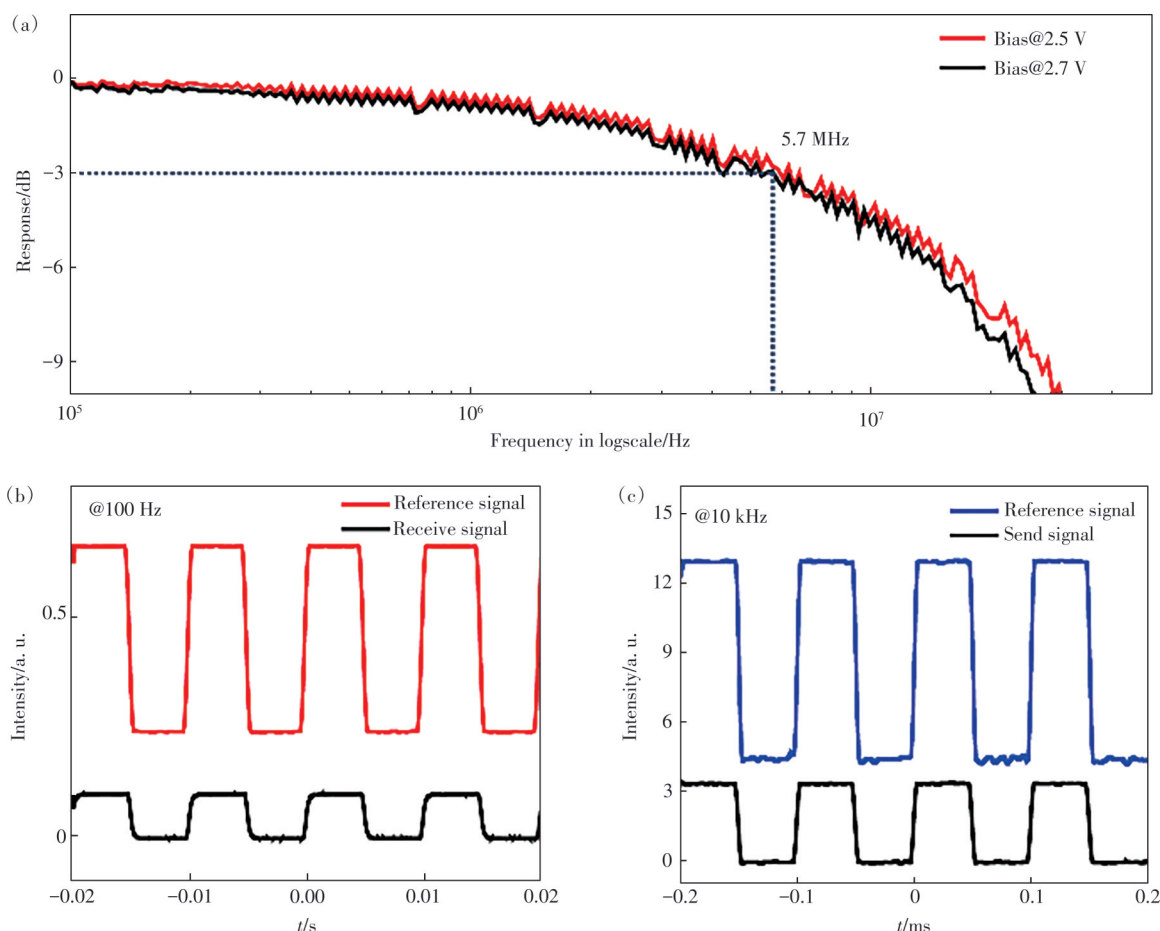


图5 Si基Ga_N多量子阱微盘器件的通信特性。(a)在不同偏压下的-3 dB带宽;(b)作为接收端的接收波形与参考波形;(c)作为发送端的发射波形与参考波形

Fig.5 Optical communication properties of Si-based GaN microdisk MQW device. (a)-3 dB 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

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(元器件列表见补充文件表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”。

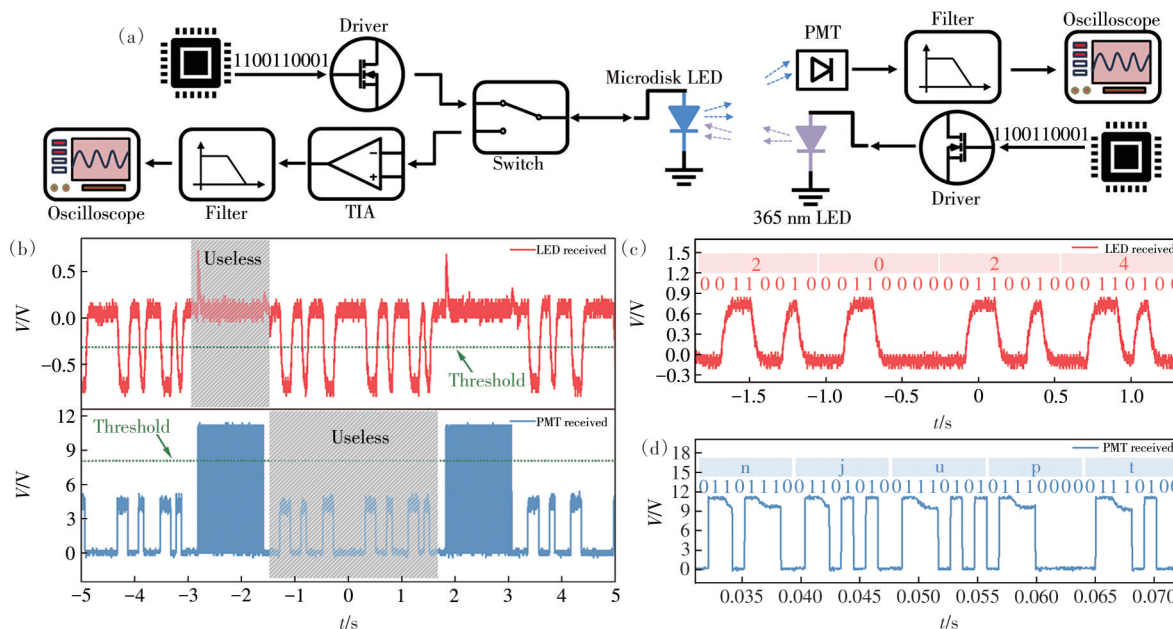


图 6 基于 Si 基 GaN 多量子阱微盘器件的半双工通信系统:(a)半双工通信系统原理图;(b)收发双方相互通信的实时波形图;(c)GaN 器件接收到的波形信息及解码内容;(d)PMT接收到的波形信息及解码内容

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

本文通过光刻和 ICP 刻蚀工艺制备了发光中心波长在 455 nm 附近的硅基 InGa_N/Ga_N 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 -3 dB 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 -3 dB 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 -3 dB 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意义。

本文补充文件和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.20240064>。

参 考 文 献:

- [1] ZOU K H, ZHANG Z W, LIAO P C, *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] PARK T Y, WANG Y, ALKHAZRAGI O, *et al.* 2-Gb/s ultraviolet-light optical wireless communication by InGa_N/Ga_N multi-quantum well dual-function micro-photodetector [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(6): 061110.
- [3] SELLÉS J, BRIMONT C, CASSABOIS G, *et al.* Deep-UV nitride-on-silicon microdisk lasers [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 21650.
- [4] FENG M X, LIU J X, 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 InGa_N/Ga_N 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 InGa_N/Ga_N light-emitting diodes [J]. *J. Phys. D Appl. Phys.*, 2020, 53(37): 375102.
- [7] FU J W, FU K, YE Z Q, *et al.* Multichannel visible light communication over a single optical path [J]. *ACS Photonics*, 2024, 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 F, *et al.* Full-color InGaN/GaN dot-in-a-wire light emitting diodes on silicon [J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(44): 445202.
- [10] ZHAO J G, CHEN K, GONG M G, *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 J, 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 InAlGa multi-quantum well UVB leds [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 122(15): 151104.
- [13] CHAI J X, KONG D Q, 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. Quantum Electron.*, 2009, 45(6): 617-622.
- [15] HAGGAR J I H, CAI Y F, BAI J, *et al.* Long-wavelength semipolar (11-22) InGaN/GaN LED with multi-Gb/s data transmission rates for VLC [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2021, 3(9): 4236-4242.
- [16] FU K, GAO X M, YE Z Q, *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 J, XU Y, YANG Y C, *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 F, LU X Y, CHEN 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 Z, HU X D, KUNDU S, *et al.* Silicon-based sensors for biomedical applications: a review [J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(13): 2908.
- [21] LYU Q F, JIANG H X, 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 Y, XU Z Y, NIU W Q, *et al.* Si-substrate vertical-structure InGaN/GaN micro-LED-based photodetector for beyond 10 Gbps visible light communication [J]. *Photonics Res.*, 2022, 10(10): 2394-2404.
- [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 W, ZHANG J M, *et al.* Organic photoplethysmography sensor based on directional emission microcavity organic light-emitting device [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2024, DOI: 10.1002/lpor.202400042.
- [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 W, HUI K N, LAI P T, *et al.* Lasing in GaN microdisks pivoted on Si [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(21): 211101.
- [27] SHAN X Y, ZHU S J, LIN R Z, *et al.* Improvements of the modulation bandwidth and data rate of green-emitting CsPbBr₃ perovskite quantum dots for Gbps visible light communication [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(2): 2195-2207.
- [28] XIAO X T, TANG H D, ZHANG T Q, *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,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。

E-mail: qinfeifei@njupt.edu.cn



朱刚毅(1980-),男,河南洛阳人,博士,副教授,2013年于东南大学获得博士学位,主要从事微纳光电器件的研究。

E-mail: zhugangyi@njupt.edu.cn