

基于氮化镓集成光电子芯片的单通道全双工可见光通信系统

胡泽锋, 傅康, 王浩, 王永进*

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要: 为了应对新一代通信技术频谱危机, 根据量子阱二极管发光谱和探测谱存在重叠区的物理现象, 提出一种基于氮化镓集成光电子芯片的单通道全双工可见光通信系统。采用具有相同量子阱结构的一对蓝光、绿光氮化镓量子阱二极管器件, 分别作为光发射器和光接收器, 器件集成 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 分布式布拉格反射镜 (DBR), 将入射光和发射光隔离, 实现单通道全双工光通信。测试结果表明, 该可见光通信系统通过集成氮化镓光电子芯片, 节约了信道空间, 对面向未来 6G 的可见光通信技术的发展具有重要意义。

关键词: 全双工可见光通信; 多量子阱; 分布式布拉格反射镜; 单通道; 氮化镓集成光电子

中图分类号: TN256 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2023)01-0040-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.01.007

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID): 

Single channel full duplex visible light communication system based on GaN integrated optoelectronic chip

HU Zefeng, FU Kang, WANG Hao, WANG Yongjin*

(School of Communication and Information Engineering,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to deal with the spectrum crisis of the new generation of communication technology, according to the physical phenomenon of overlapping area between quantum well diode emission spectrum and detection spectrum, and a single channel full duplex visible light communication system based on GaN integrated optoelectronic chip is proposed. A pair of blue light and green light gallium nitride quantum well diode devices with the same quantum well structure are used as optical transmitter and optical receiver, respectively. The devices are integrated with $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ distributed Bragg reflector (DBR). Incident light and emitted light are isolated to realize single-channel full-duplex optical communication. The test results show that the visible light communication system can save the channel space through the integration of gallium nitride optoelectronic chip, which is of great significance for the development of future 6G visible light communication technology.

Key words: full duplex visible light communication, multiple quantum well, distributed Bragg reflector, single channel, GaN integrated optoelectronic

0 引言

为了应对未来高度数字化、信息化的社会对无线

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFE0112000) 资助; 国家自然科学基金项目 (U21A20495) 资助。

作者简介: 胡泽锋 (1998—), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学通信与信息工程学院通信与信息系统专业, 主要从事氮化镓集成光电子芯片、可见光无线通信技术方面的研究工作, 并对具体的水下可见光通信和可见光视频通信技术进行研究。



* 通信作者: 王永进 (1977—), 男, 江苏徐州人, 博士, 教授, 主要研究方向为无线光通信技术。

通信的需求, 第六代移动通信技术 (6G) 在无线连接的维度、广度都有巨大的提升空间^[1-3]。于是, 人们开始对 6G 领域进行面向未来的竞争力研究。从工信部和多家研究院分别发布的 6G 白皮书可知, 6G 通信将不再局限于原有的无线频谱资源^[4-5], 可见光通信 (VLC) 有效地对现有频谱资源进行了补充^[6-7]。可见光的波长在 380~780 nm^[8-9], 其作为一种高速、安全、无电磁污染的高速通信技术, 能够应对 6G 通信系统的主要挑战。在未来, VLC 将在各种大规模物联网和 6G 通信应用场景下 (比如未来的智慧照明通信系统^[10-12]、水下通信^[13-15]、室内定位^[16-17]、智慧城市、智慧交通^[18-19]) 提供大规模连

接,在 6G 通信网络中担任重要的角色。

氮化镓量子阱二极管具有发光、传输、调制、探测等功能,将其用做发射器时可以通过载波信号发送调制的光信号,用做接收器时可以探测和解码光信号^[20-22];同时,在二极管底部的蓝宝石表面沉积一个分布式布拉格反射镜(DBR)层,通过 DBR 层滤除发射光信号中的杂波,有效减少了不同光信号之间的串扰,使信号波形更加平滑,符号解调更加容易。这意味着同一个信道中可以传输多种光波,实现了通信的集成化,减小了收发设备的体积,有效节省了信道空间。因此,氮化镓集成光电子芯片可以应用在可见光音视频通信、室内 VLC 系统或者其它自由空间光通信设备^[23-24]中,具有广阔的应用场景。

在 6G 时代,VLC 作为应对电磁频谱危机的新一代通信技术,氮化镓集成光电子芯片可以便捷地实现 6G 通信所需的低成本、低功耗、小体积的通信方式。因此,本文提出一种基于氮化镓集成光电子芯片的单通道全双工可见光通信系统。

1 系统设计

1.1 系统结构

本文提出的一种基于氮化镓集成光电子芯片的单通道全双工可见光通信系统如图 1 所示。首先,采用绿-蓝-蓝-绿的通信模式在系统两端放置 2 个具有相同量子阱结构的绿光氮化镓光电子芯片作为系统发射器和接收器,中间再放置 2 个蓝光芯片实现蓝光通信;然后,绿光芯片通过 DBR 层发出的光经过中间的蓝光芯片被另一端的绿光芯片接收器接收,使两端的绿光芯片同时实现绿光通信。

1.2 系统原理

系统理论模型如图 2 所示。其中,灰色部分是 DBR 层,紫色部分是蓝宝石衬底。首先,绿光芯片的 DBR 层可以阻止蓝光和绿光的通过,而蓝光芯片上的

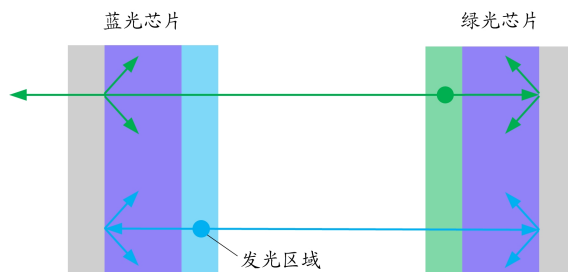
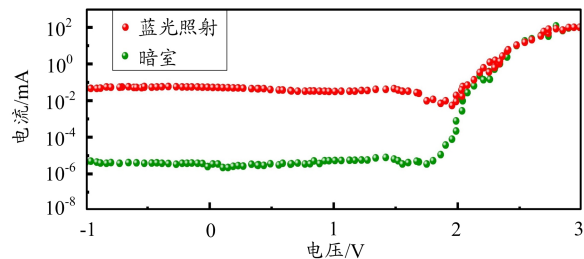


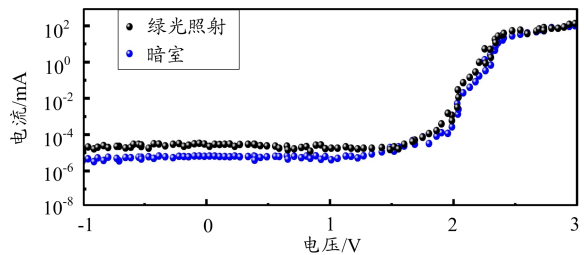
图 2 系统理论模型

DBR 层会滤除蓝光,允许绿光通过,这样就可以解决接收器不同光信号之间的串扰问题。DBR 层作为光学反射器将入射光反射回去能改善光信号接收效果。

不同外部激励下,绿光、蓝光芯片的电流-电压(I-V)曲线图如图 3 所示。图 3(a)中,绿光芯片在蓝光光源的刺激下,光电流发生了显著变化,从 10^{-6} mA 变化到 10^{-1} mA;图 3(b)中,当给蓝光芯片的外部光源激励为绿光时,蓝色芯片几乎未受影响,光电流保持约



(a) 在蓝光照射和暗室情况下绿光芯片的 I-V 曲线



(b) 在绿光照射和暗室情况下蓝光芯片的 I-V 曲线

图 3 不同光照下,绿光、蓝光芯片的 I-V 曲线

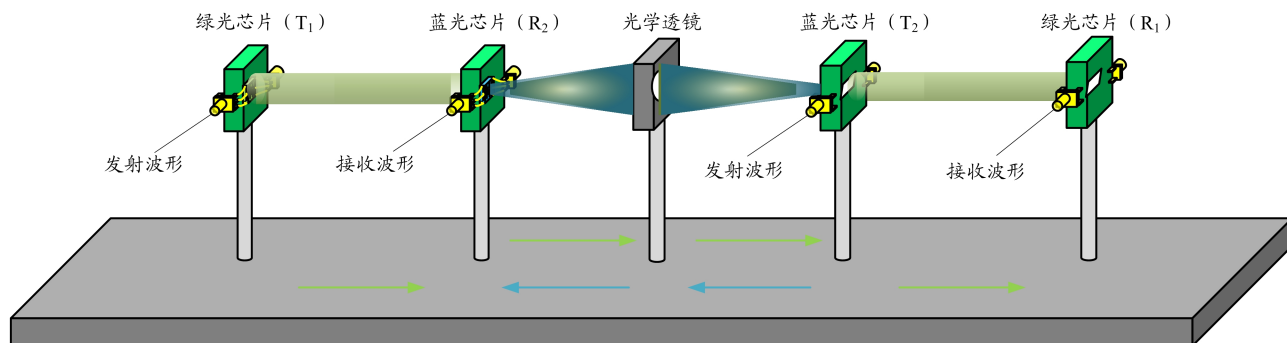


图 1 基于氮化镓集成光电子芯片的单通道全双工可见光通信系统示意图

胡泽锋,傅康,王浩,等. 基于氮化镓集成光电子芯片的单通道全双工可见光通信系统

10^{-5} mA。由此可知,当外部光源为蓝光时,绿光芯片很容易被激发并产生光电流。

1.3 芯片制备

本文在系统中制备了蓝光和绿光 2 种氮化镓光电子芯片,其中蓝光器件的工艺制备流程如图 4 所示。首先,利用金属有机化学气相沉积(MOCVD)在 4 英寸蓝宝石衬底上生长出由本征 GaN (u-GaN)、Si 掺杂的 n-GaN、InGaN/GaN 多量子阱和 Mg 掺杂的 p-GaN 组成的外延膜,通过光刻和电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀移除部分外延膜以进行器件隔离;其次,通过磁控溅射形成 230 nm 厚的透明氧化铟锡(ITO)电流扩展层,再在氮气环境下进行快速退火 7 min,接着使用 HCl/FeCl₃ 混合物对 ITO 层进行湿法腐蚀,直到完全暴露 n-GaN 表面;再次,在 n-GaN 和 ITO 表面上沉积多层金属进行金属剥离和快速热退火;然后,为了保护器件,通过等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术将 1000 nm 厚的 SiO₂ 层沉积到器件表面,再用光刻确定电极和键合区域,并用 SF₆、CHF₃ 和 He 的混合物进行 ICP 干法刻蚀;最后,将蓝宝石衬底研磨抛光至 200 μ m,利用光学薄膜镀膜机在芯片底部的蓝宝石表面沉积一个 DBR 层。芯片制造完成后,通过紫外纳秒激光微加工进行划片。

绿光芯片与蓝光芯片在工艺制备上基本一致,只在刻蚀深度和 DBR 层结构上略有不同。蓝光 DBR 层具有反射蓝光和透射绿光,而绿光 DBR 层则同时反射

蓝光和绿光。制备完成后的氮化镓集成光电子芯片具备发光、调制、传输、探测等功能。沉积在芯片底部的 DBR 层有 2 个主要作用:用做光学滤波器时,可以滤除发射光信号中的杂波;用做光学反射器时,可以将入射光反射回去改善光的吸收。

本文使用相同量子阱结构的二极管作为发射器和接收器。由于氮化镓量子阱二极管的发光谱和探测谱存在重叠区域,因此接收器能够吸收从相同量子阱结构的发射器中发出的短波长光子,从而生成光电流。

图 5 为氮化镓光电子芯片的光镜图。其中,P 电极和 N 电极通过金属线进行焊接用作测试表征。可以看出,在器件表面电极呈梳齿状,有效改善了电流分布的均匀性。

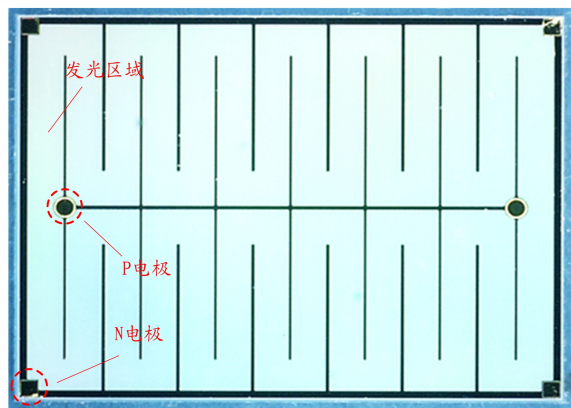


图 5 氮化镓光电子芯片整体光镜图

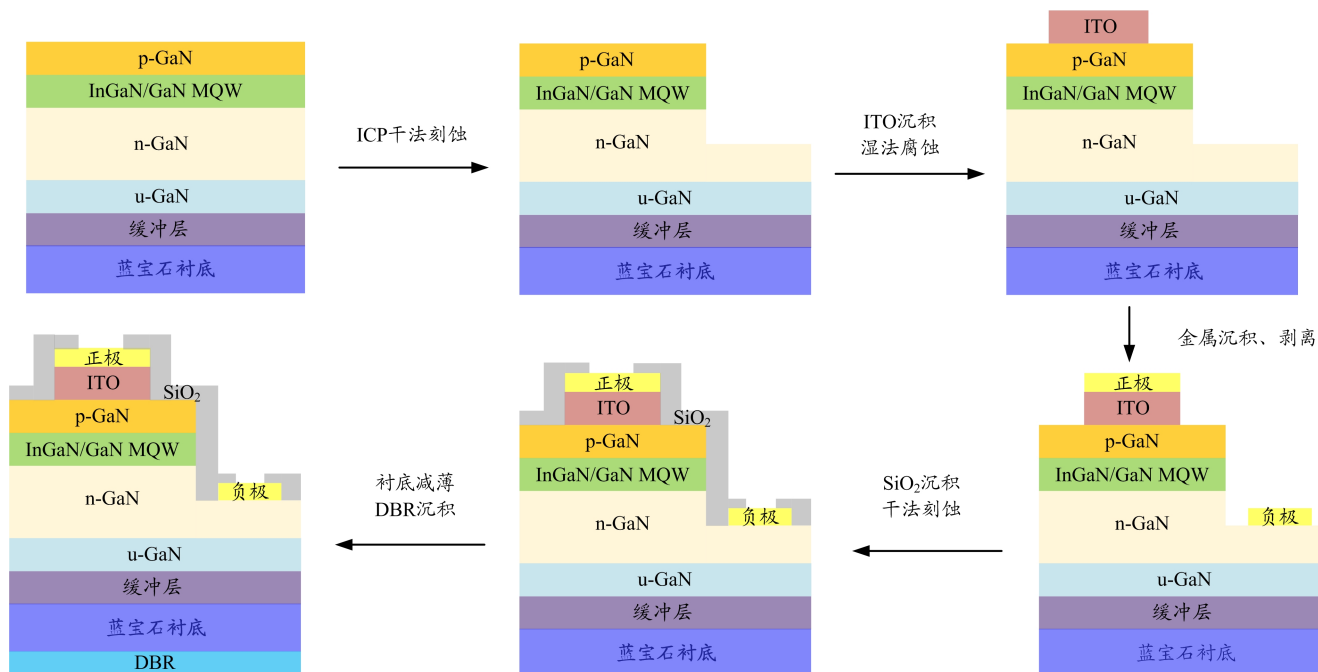


图 4 蓝光器件的芯片制备流程图

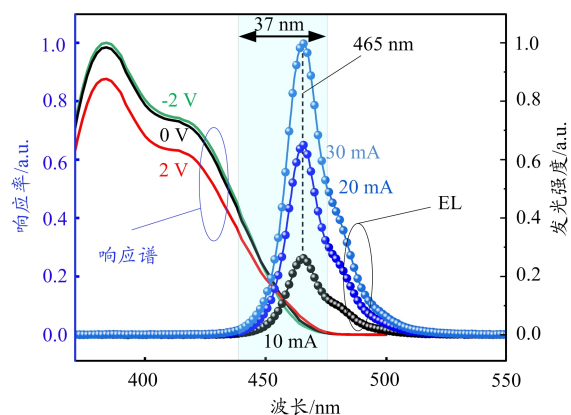
2 系统性能测试

本文对 2 种氮化镓集成光电子芯片(蓝光和绿光)的 I-V 特性、芯片发光谱和探测谱、芯片通信性能,以及所提系统全双工通信性能进行了测试。

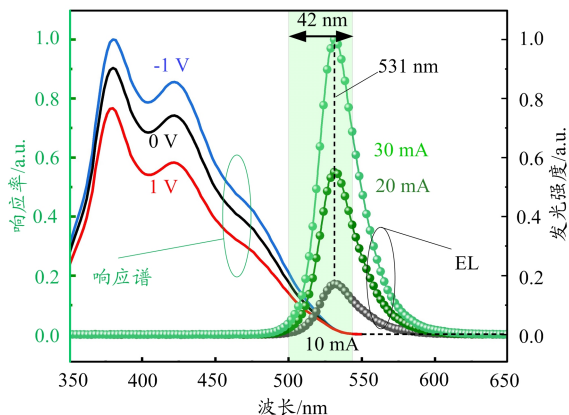
2.1 芯片性能测试

2.1.1 芯片基础性能测试

首先,使用半导体参数仪分别测试蓝光和绿光芯片的 I-V 特性。蓝光和绿光芯片的正向开启电压分别为 2.2 V、1.9 V,同时分别使用光纤光谱仪和单色仪对蓝光和绿光芯片的电致发光谱(EL)和探测响应谱进行记录、测量。芯片基础性能测试结果如图 6 所示。图中左侧坐标对应的是蓝光芯片和绿光芯片分别在恒压-2 V、0 V、2 V 和恒压-1 V、0 V、1 V 激励下的探测响应谱,右侧坐标为蓝光芯片和绿光芯片在恒流 10 mA、20 mA、30 mA 激励下的 EL。可以看出,蓝光芯片的光谱峰值波长为 465 nm,其 EL 和响应谱之间存在 37 nm 的重叠区域;绿色芯片的光谱峰值波长为 531 nm,其 EL 和响应谱之间也有 42 nm 的重叠。这表明使用具有相同量子阱结构的二极管芯片在通信方案中可同时



(a) 蓝光芯片发光探测谱



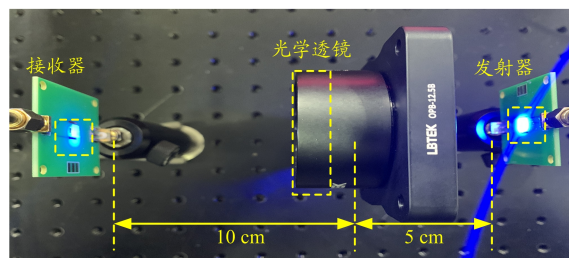
(b) 绿光芯片发光探测谱

图 6 芯片基础性能测试

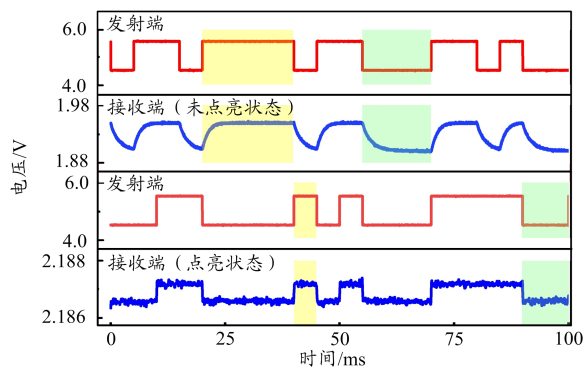
用做发射器和接收器。

2.1.2 芯片通信性能测试

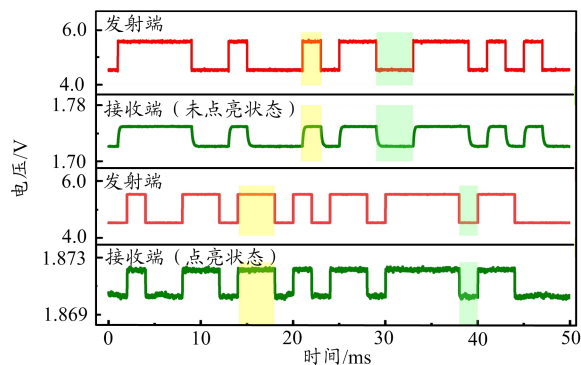
为了测试氮化镓集成光电子芯片作为接收器检测光信号的性能,本文搭建了通信测试平台如图 7(a)所示。测试时,使用具有相同量子阱结构的二极管作为发射器和接收器,并在 2 片芯片之间放置 1 个光学透镜用来聚焦光信号。在发射端,信号发生器以伪随机二进制序列(PRBS)信号直接驱动发射器;在接收端,分别使用不加偏置电压和加偏置电压点亮芯片进行接收,接收器将接收到的光信号转换为电信号,并送入到数字存储示波器中显示。在蓝光发射芯片和绿光发射芯片上搭载信号传输速率分别为 200 b/s 和 100 b/s 的 PRBS 信号,波形图如图 7(b)和图 7(c)所示。可以看出,蓝光接收芯片在 0 V(未点亮状态)和



(a) 通信测试平台



(b) 200 b/s 时蓝光芯片的通信波形



(c) 100 b/s 时绿光芯片的通信波形

图 7 芯片通信性能测试

胡泽锋, 傅康, 王浩, 等. 基于氮化镓集成光电子芯片的单通道全双工可见光通信系统

2.5 V(点亮状态)的直流偏置下均可以正常地接收信号;绿光芯片在 0 V(未点亮状态)和 2.5 V(点亮状态)的直流偏置下同样也能正常接收信号。以上测试结果说明蓝、绿光芯片在点亮的状态下可以同时发光和接收光信号。

2.2 系统全双工通信测试

系统全双工通信测试情况如图 8 所示。在图 8(a)和图 8(b)中,蓝光芯片 T_2 发送 100 b/s 的 PRBS 信号,绿光芯片 T_1 发射 2 b/s 信号,接收端的蓝光芯片 R_2 几乎可以正确恢复蓝光芯片 T_2 发送的信号。这是因为蓝光芯片对于绿光激励几乎不会产生光电流变化,所以 R_2 几乎不会受到 T_1 的干扰。虽然借助 DBR 层减少了蓝光对绿光芯片 R_1 的干扰,但是由于信道空间的衰

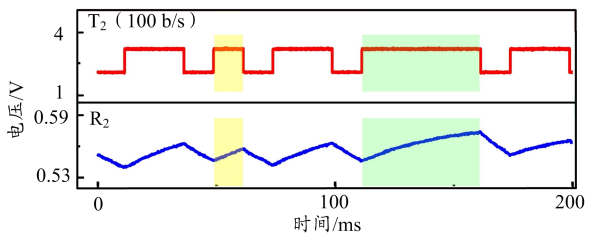
落,绿光芯片 R_1 接收的信号仍会产生失真。将蓝光芯片 T_2 的发射信号替换为 100 Hz 的方波信号,绿光芯片 T_1 发射 2 b/s 的 PRBS 信号,从图 8(c)、图 8(d)可以看出,接收端的 R_2 、 R_1 可以正确地接收光信号。上述实验证明在传输不同信号的情况下,本文所提的单通道全双工光通信系统可以实现良好的通信。

3 结束语

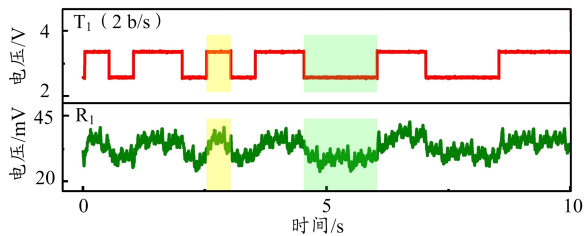
针对 6G 通信中低时延、高可靠、高速率的数据传输需求,为了降低系统开销,提高传输效率,本文基于氮化镓量子阱二极管的发光谱与探测谱存在重叠区域这一现象,研制了基于氮化镓集成光电子芯片,将具有相同量子阱结构的二极管芯片作为发射器和接收器,利用 DBR 层的滤波和反射光波的作用,有效抑制了不同光信号之间的串扰,改善了光信号的接收,实现了在单信道内的全双工可见光通信。与传统的通信技术相比,这种新型的 VLC 技术既节约了信道空间和成本,又具有抗干扰能力强、保密性好、高度集成化等优点,未来可以将其用于全双工的音视频通信、智慧城市等应用场景,对 6G 通信发展具有重要意义。

参考文献:

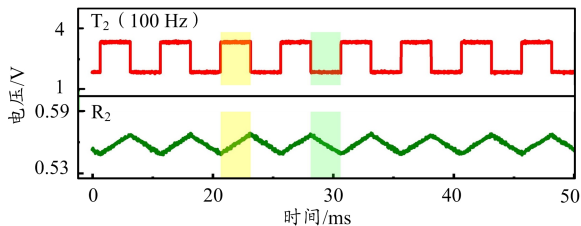
- [1] 包荣珍,彭朗,贾松霖,等. 面向 6G 的欠采样相移键控可见光调制方案[J]. 移动通信, 2022, 46(6): 31–37.
- [2] SERGIOU C, LESTAS M, ANTONIOU P, et al. Complex systems: a communication networks perspective towards 6G[J]. IEEE Access, 2020, 8: 89007–89030.
- [3] EMILIO C S, SERGIO B, JOSE L G, et al. 6G: The next frontier: from holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 42–50.
- [4] 施剑阳,牛文清,徐增熠,等. 面向 6G 的可见光通信关键技术[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6): 692–697.
- [5] WANG L, HAN D, ZHANG M, et al. Deep reinforcement learning-based adaptive handover mechanism for VLC in a hybrid 6G network architecture[J]. IEEE Access, 2021(9): 87241–87250.
- [6] YAO S, CHAI H, LEI L, et al. Parallel micro-LED arrays with a high modulation bandwidth for a visible light communication[J]. Optics Letters, 2022, 47(14): 3584–3587.
- [7] LIN P, HU X, RUAN Y, et al. Real-time visible light positioning supporting fast moving speed [J]. Optics Express, 2020, 28 (10): 14503–14510.
- [8] 王永进,傅康,王林宁. 一种基于可见光通信技术的光互联方案[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2020, 40(5): 134–140.
- [9] TANI K, OKUMURA T, ODA K, et al. On-chip optical interconnection using integrated germanium light emitters and photodetectors[J]. Optics Express, 2021, 29(18): 28021–28036.



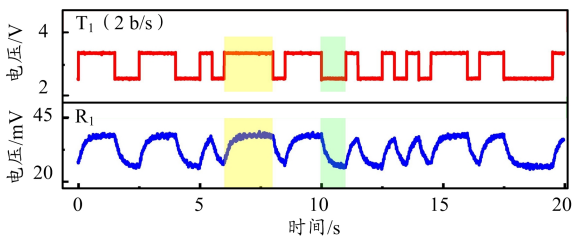
(a) 100 b/s 时蓝光芯片 T_2 的 PRBS 信号



(b) 2 b/s 时绿光芯片 T_1 的 PRBS 信号



(c) 100 Hz 时蓝光芯片 T_2 的方波信号



(d) 2 b/s 时绿光芯片 T_1 的 PRBS 信号

图 8 系统全双工通信测试

- [10] HSIA S C, SHEU M H, CIOU J J. Cost-effective LED dimming driver with single chip design for smart lighting system [J]. IEEE Access, 2020, 8: 141025–141032.
- [11] 韦启军. LED 智慧照明与通信系统(可见光通信)在智能建筑中的新应用及未来发展[J]. 智能建筑, 2016(2): 53–54.
- [12] MARIMUTHU G, UMAMAHESWARI M G, KOMATHI C, et al. Design and implementation of modified type-III bridgeless cuk LED driver for smart lighting applications[J]. Electrical Engineering, 2022: 1–16.
- [13] 赵晓燕. 水下可见光通信关键技术研究 [J]. 电子技术与软件工程, 2021(4): 15–16.
- [14] MATTA G, PANDEY P, AGRAWAL M, et al. Capacity analysis of underwater visible light communication systems over a lossy channel in the presence of noises[J]. Journal of the Optical Society America A: Optics, Image Science & Vision, 2022, 39(5): 948–958.
- [15] HAMAGAMI R, EBIHARA T, WAKATSUKI N, et al. Optimal modulation technique for underwater visible light communication using rolling-shutter sensor[J]. IEEE Access, 2021(9): 146422–146436.
- [16] 余桂英, 金炜佳. 基于可见光强度的室内定位技术研究[J]. 中国计量大学学报, 2020, 31(1): 21–25.
- [17] KHALIFEH A, ALAKAPPAN K, SATHISH K B K, et al. A simulation analysis of LEDs' spatial distribution for indoor visible light communication [J]. Wireless Personal Communications, 2022, 122(2): 1867–1890.
- [18] 田宇航. 可见光通信的发展与应用 [J]. 数字通信世界, 2017(12): 182–188.
- [19] ZAKARIA I, ABAZA M, FEDAWY M, et al. Performance analysis of hybrid free space optical and visible light communications for underwater applications using spatial diversity [J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(10): 1–21.
- [20] 高绪敏. 面向可见光通信的硅基氮化物同质光电子集成芯片研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
- [21] 王永进, 尹清溪, 叶子琪, 等. 可见光通信感知一体化芯片及关键技术[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(8): 2725–2729.
- [22] FU K, GAO X, YIN Q X, et al. Full-duplex visible light communication system using a single channel[J]. Optics Letters, 2022, 47(18): 4802–4805.
- [23] SINGH K, CHEBAANE S, BEN KHALIFA S, et al. Investigations on mode-division multiplexed free-space optical transmission for inter-satellite communication link[J]. Wireless Networks, 2022, 28(3): 1003–1016.
- [24] FERREIRA R X G, XIE E, MCKENDRY J J D, et al. High bandwidth GaN-based micro-LEDs for multi-Gb/s visible light communications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(19): 2023–2026.