

可见光无线传能通信一体化芯片

王浩, 高绪敏, 胡泽锋, 张晨辰, 王永进*

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要:为了解决水下环境中物联网感知终端的能源供给难题,利用氮化镓量子阱二极管的多功能光电特性,采用兼容的制造工艺,在同一块氮化镓芯片上集成能源、照明、通信和感知等器件,在器件之间实现互联,制备出氮化镓能源通信感知一体化芯片,并对该芯片进行了可见光无线传能和通信实验。实验结果表明:该芯片能够吸收外界的光脉冲信号并产生稳定的信号输出,且信号发射速率能够达到 1 Mb/s,具有中继通信的潜力;在水下环境中该芯片也能实现能源的采集与信号通信。

关键词:量子阱二极管;通信感知一体化;中继光通信;能源自供给;生物可穿戴设备

中图分类号:TN256 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2023)01-0025-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.01.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Visible light wireless energy
transmission communication integrated chip

WANG Hao, GAO Xuming, HU Zefeng, ZHANG Chenchen, WANG Yongjin*

(School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to solve the energy supply problem of the perception terminal of the internet of things in underwater environment, the multifunctional photoelectric characteristics of gallium nitride quantum well diode and compatible manufacturing process are utilized to integrate energy, lighting, communication and perception components on the same gallium nitride chip, and realize interconnection among the devices, so as to prepare gallium nitride energy communication and perception integrated chip. Experiments of visible light wireless energy transmission and communication are carried out on the chip. The experimental results show that the chip can absorb external optical pulse signal and generate stable signal output, and the signal transmission rate can reach 1 Mb/s, which has the potential of relay communication. The chip can also realize energy acquisition and signal communication in underwater environment.

Key words: quantum well diode, integrated communication and sensing, trunking optical communication, self supply of energy, bio-wearable devices

0 引言

近十年来,物联网(IoT)已成为一项极具发展潜力的新技术^[1-4],得到了各国政府、社会各界的高度重视,甚至在美国、欧盟、日本等国家和地区的信息战略

收稿日期:2022-10-31。

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:王浩(1998—),男,安徽宣城人,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,主要研究方向为量子阱二极管芯片的验证和可见光通信系统的搭建,并对具体的水下中继光通信进行研究。

* **通信作者:**王永进(1977—),男,教授,主要研究方向为光通信及集成光电子芯片。



中都有它的身影。

为了应对全球气候变暖和资源枯竭等问题,人们已经开始把目光投向未知的海洋,大力发展海洋勘探、海洋遥感等水下技术^[5-6]。IoT技术的进步和对海洋探索的深入,导致了水下连接设备数量的爆发式增长。由海洋传感器、水听器、水下摄像机等水下设备组成的水下物联网(IoUT)概念也随之被提出^[7-9]。现有的水下通信系统大多采用光或声作为传输媒介^[10-11],通信时不可避免地会产生电量损耗,对于水下设备来说,维护和更换电池是非常复杂的。因此,延长电池寿命是IoUT面临的最大挑战之一^[12-14]。

氮化镓材料具有直隙宽禁带的特点,是短波长发

王浩,高绪敏,胡泽锋,等.可见光无线传能通信一体化芯片

光器件的理想材料,且通过制备 InGaN/GaN 多量子阱可以使发光二极管(LED)器件内量子效率超过 90%,是最节能的光源之一。基于氮化镓基量子阱二极管的发光探测共存的物理现象,可将具有相同量子阱结构的量子阱二极管器件制备在同一块芯片上,利用此芯片可通过光伏效应将光转换为不同形式的电信号的特性^[15-17],并借助成熟的兼容工艺,可在单晶片上同时集成发光、探测、能量采集等器件,从而实现器件的小型化。

基于以上特点,氮化镓材料的光电器件在水下物联网这一领域具有广阔前景。因此,本文提出氮化镓能源通信感知一体化芯片。

1 芯片的制备

芯片的制备过程见文献[18]。芯片制备完成后,沉积 SiO₂ 材料于钝化层、蓝宝石衬底表面,形成透明防水层,以保护芯片内的金属连接线、通孔连接结构和衬底,从而实现氮化镓能源通信感知一体化芯片的防水功能。

制备完成的氮化镓能源通信感知一体化芯片厚度为 0.2 mm、长为 6.9 mm、宽为 6.9 mm、质量为 42 mg,光镜图如图 1 所示。单片芯片集成了以前相互独立的探测、发射、能量收集功能。其中,能源器件具有探测和能量收集功能,能够利用光伏效应将来自于外界环境中的光能转换为电能,再通过电能驱动 LED 向外界发射光信号,实现 LED 的照明功能;同时,由于能源器件为氮化镓基量子阱二极管结构,因此其光发射谱和光探测谱必定会存在重叠区域。接收器件能够吸收具有相同量子阱结构的发射器件发出的短波长高能光子,生成光电流并将光电流携带的信息加载至 LED,驱动 LED 点亮并进行无线中继光通信。

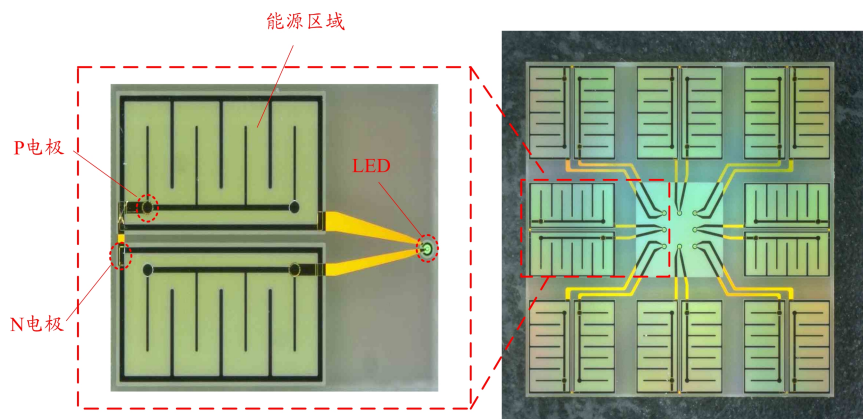


图 1 氮化镓芯片光镜图

2 芯片的表征

对氮化镓能源通信感知一体化芯片的表征分为光学性能测试和电学性能测试,具体包括芯片的电流-电压(I-V)特性测试、光发射谱和探测谱测试、能源特性测试等。

本文使用半导体参数仪测试芯片的 I-V 特性如图 2 所示,左上角 2 张插图显示了在环境光(LED 照射、暗室)的条件下,正向电压为 2.1 V 开启电压时的芯片发光图像。芯片内通过的电流为 5.71 μ A。由图 2 可知,LED 在有外部光照的情况下,吸收光源发出的光子进行光/电转化,产生光电流,此时测量的电流实际是芯片自身产生的驱动电流和芯片吸收环境光光子产生的光电流的总和。

氮化镓能源通信感知一体化芯片可以吸收光子产生光电流,本文以注入电流为变量绘制电致发光(EL)光谱如图 3 所示。当芯片作为发光器件工作时,使用光谱仪对二极管的发光强度进行测试,随着注入电流从 5 mA 增加到 15 mA 时,发光谱波峰在 514.8~515.3 nm 范围内出现轻微的蓝移。此外,通过使用 Oriol IQE-200B 系统的单色光照明探测设备来测量量子阱二极管的探测谱,对芯片在 -1 V、0 V、1 V 电压偏置下的探测谱响应率进行测试。从图 3 可以看出,器件探测谱响应率在波长为 382 nm 时达到最高点。发光谱和探测谱之间有接近 62 nm 的光谱重叠区域,体现了量子阱二极管的发光、探测共存特性。

图 4 为芯片的能源特性图。在 Oriol Sol3A 太阳光模拟器模拟的 1 日照度下,单个采集单元可产生 3.71 V 的开路电压 V_{oc} 和 1.10 mA/cm² 的短路电流密度 J_{sc} ;使用积分球测试后得出芯片能源的填充系数 (FF) 为 56.2%,光电转化效率(PCE)为 2.28%。芯片产生的能量可以储存在电池或电容中。

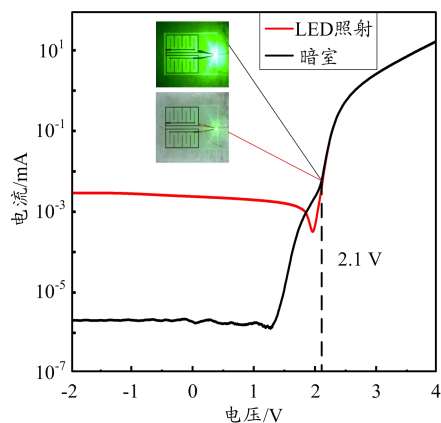


图 2 氮化镓芯片 I-V 特性

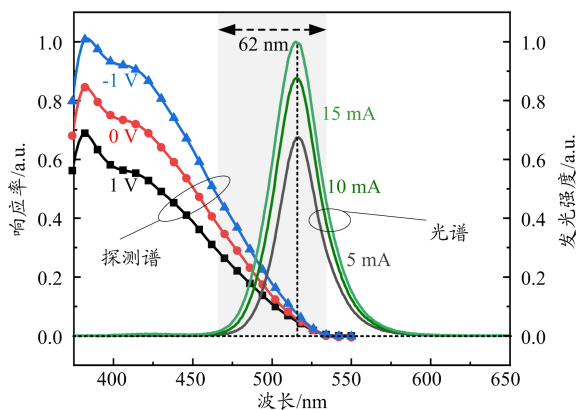


图3 EL光谱和探测谱

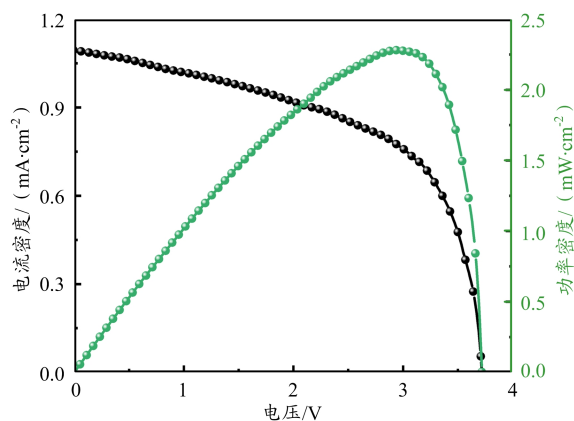


图4 能源特性

芯片的充电特性如图5所示,单个收集单元可以在14.1 s内将100 μF 的电容充电到3.71 V的稳态电压。

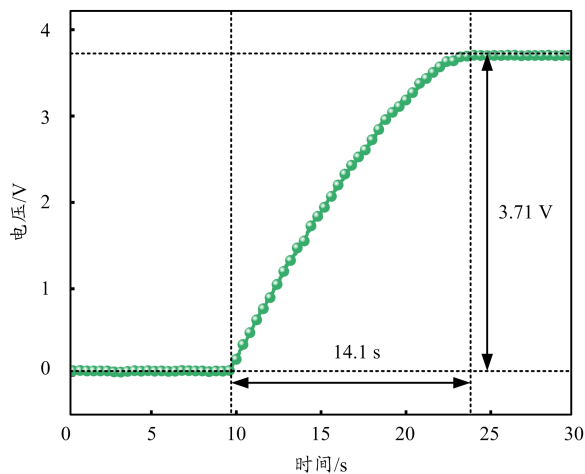


图5 充电特性

3 通信传能实验

3.1 芯片中继通信实验

本文使用信号发生器、波长为405 nm的激光器、示波器、透镜、光电探测器(PD)等实验仪器搭建的通

信系统如图6所示。

为了验证氮化镓能源通信感知一体化芯片能够同时进行无线能量采集和光通信,实现光能收集和传感功能共存的特性,本文使用信号发生器驱动激光器产生已调制的光脉冲信号,使光脉冲信号照射到发射芯片的能源器件部位。该芯片将信息编码的光转换为电能,产生的电能取决于激光器输出功率。

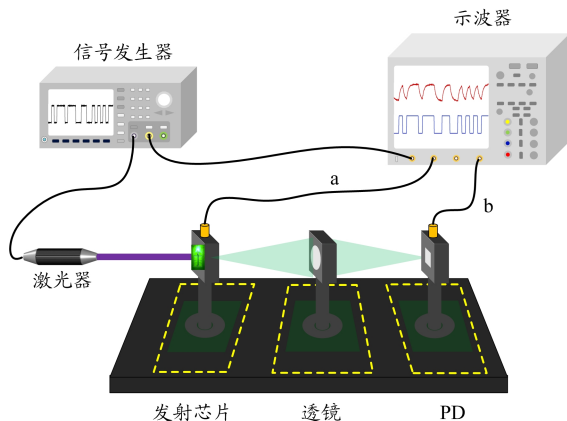


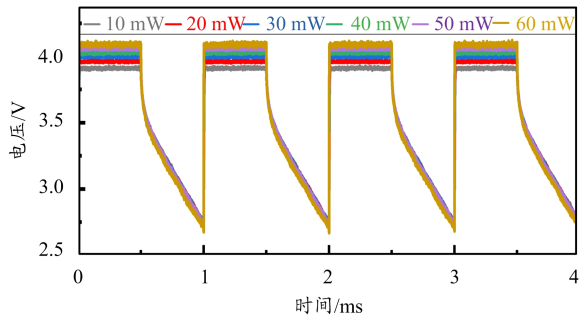
图6 通信系统示意图

第一组实验中,芯片上的能源器件不与集成LED互连,即不通过能源器件点亮LED,仅测试芯片对激光器光脉冲信号能量的采集效果,通过导线a将芯片能源器件产生的信号显示在示波器上的波形图如图7所示。可以看出,随着激光输出功率从10 mW增加到60 mW,在调制频率为1 kHz的情况下,能量采集单元可产生3.90~4.07 V的稳定工作电压。

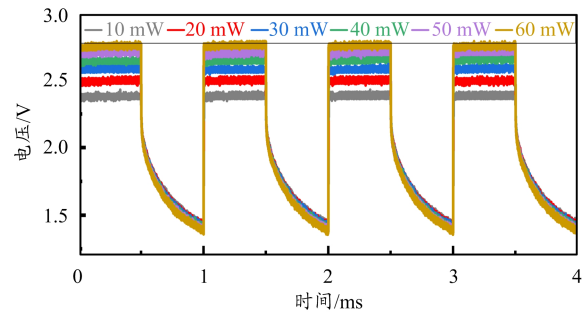
如果没有外部照明,收集到的能量会随时间衰减。当调制频率增加时,该单元产生更高的衰减信号输出,信号波形图如图8所示。激光输出功率为30 mW,在调制频率分别为500 Hz、5 kHz、50 kHz时,衰减信号输出分别为1.98 V、3.45 V、3.77 V;当调制频率较低,分别为1~5 kHz时,衰减信号输出分别为2.78 V、3.19 V、3.33 V、3.40 V、3.44 V。

第二组实验中,连接芯片上的能源器件和集成LED,使能源器件收集光脉冲信号产生的电信号能够点亮LED,仍旧通过图6中的导线a将信号显示在示波器上。与第一组实验对比可知,集成LED对能源芯片电信号产生了损耗,其信号波形图如图9所示。当激光输出功率从10 mW增加到60 mW时,采集单元以1 kHz的调制频率为LED提供从2.37~2.76 V的稳定工作电压。

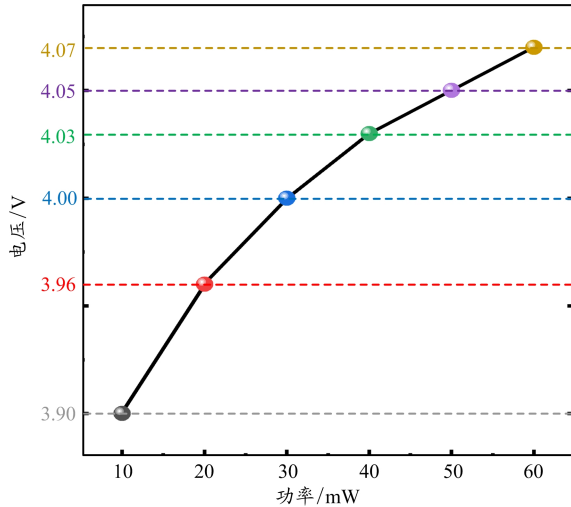
能源器连接LED时接收不同频率信号波形如图10所示。当激光输出功率为30 mW,在调制频率分



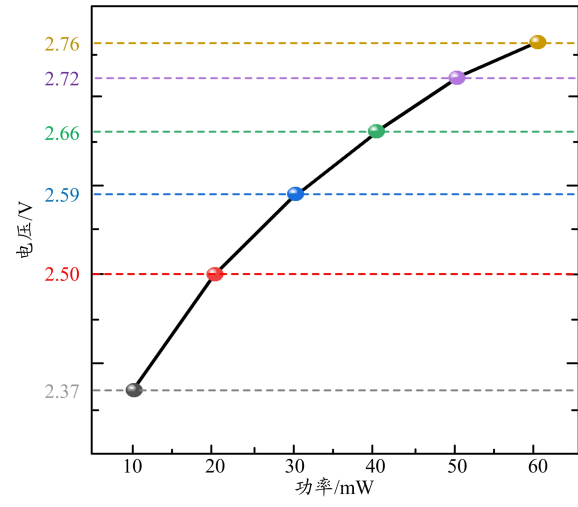
(a) 能源器件接收波形随激光功率变化图



(a) 能源器件接收波形随激光功率变化图



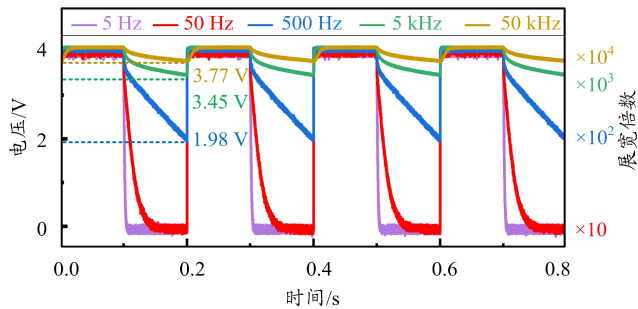
(b) 能源器件接收信号电压



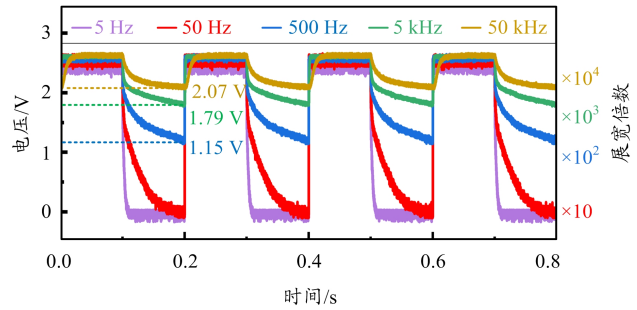
(b) 能源器件接收信号电压

图 7 能源器件不连接 LED 时接收不同功率信号波形

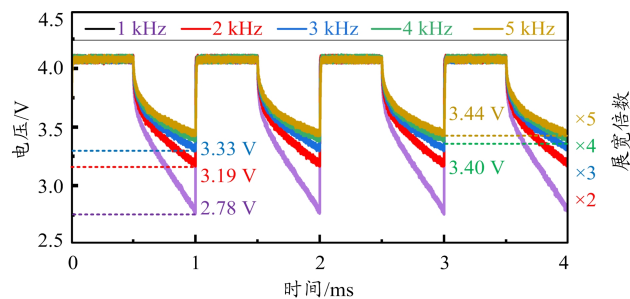
图 9 能源器件连接 LED 时接收不同功率信号波形



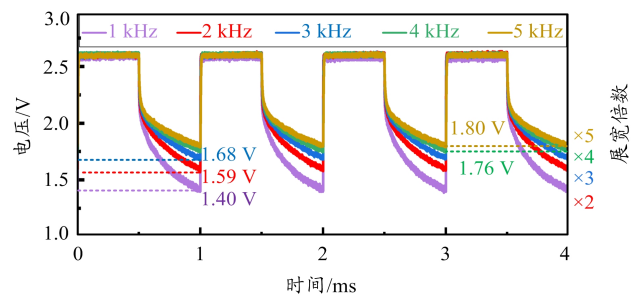
(a) 能源器件接收高频信号衰减变化图



(a) 能源器件接收高频信号衰减变化图



(b) 能源器件接收低频信号衰减变化图



(b) 能源器件接收低频信号衰减变化图

图 8 能源器件不连接 LED 时接收不同频率信号波形

图 10 能源器件连接 LED 时接收不同频率信号波形

别为 500 Hz、5 kHz、50 kHz 时,衰减信号输出分别为 1.15 V、1.79 V、2.07 V;当调制频率从 1 kHz 增加到 5 kHz 时,LED 的衰减信号输出从 1.40 V 增加到 1.80 V。

以上 2 组实验证明了氮化镓能源通信感知一体化芯片可以同时进行无线能量采集和光通信。

此外,能源器件采集激光器调制的光信号能够激活 LED 发射信息编码光用于中继通信;使用商用 PD 接收器可以解码来自单片集成 LED 芯片的信息编码光,并对其解调以恢复电信号。通过图 6 中导线 b 将 PD 接收器接收的信号直接发送到数字存储示波器,不经过额外的预整形或电路放大,通信情况如图 11 所示。可以看出,在数据传输速率为 1 Mb/s 时,原始伪随机二进制序列信号和 PD 接收器接收到的二进制序列信号几近一致。这表明氮化镓能源通信感知一体化芯片具有中继无线光通信的潜力。

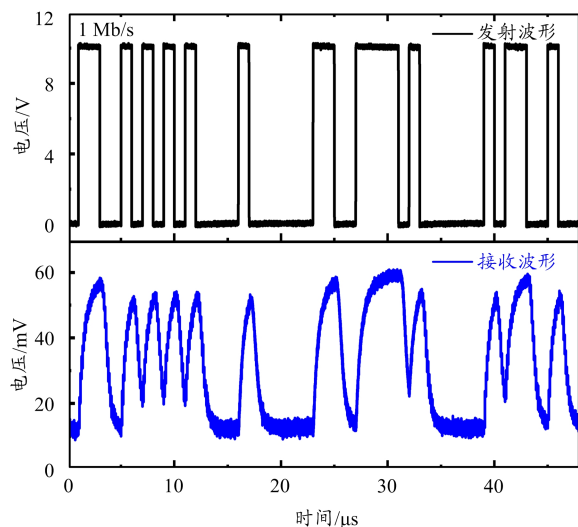
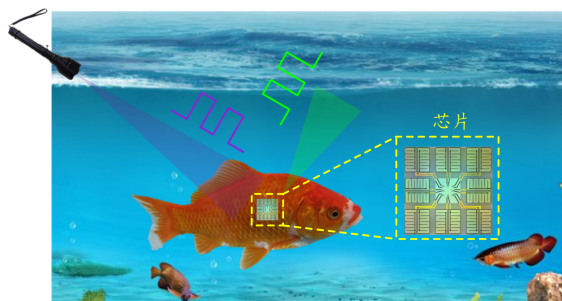


图 11 1 Mb/s 中继通信波形

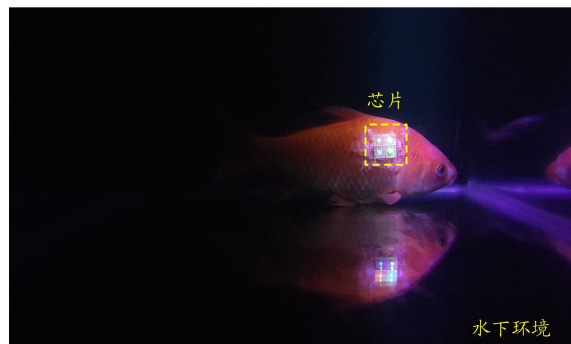
3.2 水下传能实验

基于上述芯片的传能通信实验分析,结合芯片轻量化的优点,本文使用防水胶带将芯片穿戴在活鱼身上,鱼可以在水箱中自由游动,芯片不会破坏它们的身体和水下行为。

水生生物可穿戴示意图如图 12(a)所示,使用波长为 389.4 nm 的手电筒光束照射活鱼,芯片的 4 个片内集成 LED 芯片全部亮起,所有单片集成光电系统(MGOS)阵列同时进行无线光采集和发射的操作,成功实现了水下光能传输和通信。与激发光源相比,单片集成 LED 可以放置在目标位置进行精确的照明,使照明面积更小,从而更精准追踪水生生物的运动。热带鱼穿戴芯片实物图如图 12(b)所示。



(a) 热带鱼穿戴芯片示意图



(b) 热带鱼穿戴芯片实物图

图 12 水生生物可穿戴光电设备

4 结束语

针对水下环境中物联网感知终端的能源供给难题,本文基于氮化镓量子阱二极管的多功能光电特性,通过联合使用 MGOS 工艺与已有的 GaN LED 制造技术,将能源、照明、通信和感知等器件集成到单片芯片上,实现了无线能量采集和光通信共存的特性;使用沉积 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ DBR 钝化层形成防水包装的方法,保护器件之间的金属连接线,有效地解决了水下器件能源自供给问题。这些小型化、可穿戴的 MGOS 体系结构无需复杂的外部电路就能实现多种功能。

氮化镓能源通信感知一体化芯片解决了水下设备的能源限制问题,将其应用在可见光中继通信、水下传感器、水生动物穿戴光电系统^[19-22],对于水下物联网的发展有着极其重要的意义。

参考文献:

- [1] 卢宁宁,张海鹏,杨悦,等.近零功耗物联网及其关键技术研究[J].无线电通信技术,2019,45(4):343-350.
- [2] MOHSAN S, MAZINANI A, OTHMAN N, et al. Towards the internet of underwater things: a comprehensive survey[J]. Earth Science Informatics, 2022, 15(2): 735-764.
- [3] 周洋,张松,吴明,等.水下物联网研究[J].舰船电子工程,2017,37(1):8-13,51.

王浩,高绪敏,胡泽锋,等. 可见光无线传能通信一体化芯片

- [4] GUPTA A, SHARMA N, JAIN M, et al. Multihop underwater optical wireless communication system for internet of underwater things applications [J]. International Journal of Communication Systems, 2021, 35(3): e5041.1–e5041.11.
- [5] ZENG Z Q, FU S, ZHANG H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 204–238.
- [6] 刘杨,李崔灿,彭木根. 低功耗水下物联网: 愿景与关键技术[J]. 物联网学报, 2022, 6(2): 1–9.
- [7] JAHANBAKHT M, XIANG W, HANZO L, et al. Internet of underwater things and big marine data analytics—a comprehensive survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 904–956.
- [8] WU F Y, SONG Y C, YANG K. An effective framework for underwater acoustic data acquisition[J]. Applied Acoustics, 2021, 182(11): 108235.1–108235.9.
- [9] MISHACHANDAR B, VAIRAMUTHU S. An underwater cognitive acoustic network strategy for efficient spectrum utilization [J]. Applied Acoustics, 2021, 175(8): 107861.1–107861.9.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] LIOU E C, KAO C C, CHANG C H, et al. Internet of underwater things: challenges and routing protocols [C]//IEEE. Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1171–1174.
- [13] VAN H N, HOANG D T, LU X, et al. Ambient backscatter communications: a contemporary survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2889–2922.
- [14] WANG H, WANG S L, ZHANG E Y, et al. An energy balanced and lifetime extended routing protocol for underwater sensor networks [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(5): 1596–1596.
- [15] 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.
- [16] 唐先胜. 多量子阱结构中光生载流子输运性质的研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2021.
- [17] LIU C, MELANSON B, ZHANG J. AlGaIn-Delta-GaN quantum well for DUV LEDs[J]. Photonics, 2020, 7(4): 87–87.
- [18] 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[J]. 光通信技术, 2023, 47(1): 40–45.
- [19] GAO X M, LIU P Z, YIN Q X, et al. Wireless light energy harvesting and communication in a waterproof GaN optoelectronic system [J]. Communications Engineering, 2022, 1(1): 1–7.
- [20] HAO H H, LIU P, SU P, et al. Sea-trial research on natural product-based antifouling paint applied to different underwater sensor housing materials [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2022, 170: 105400–105400.
- [21] 陈礼昕,彭光强,何竞松,等. 全光纤电流互感器系统光纤器件的双折射误差分析[J]. 光通信技术, 2022, 46(3): 33–37.
- [22] NATARAJAN V P, THANDAPANI K. An improvement of communication stability on underwater sensor network using balanced energy efficient joining distance matrix[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2022, 13(1): 690–698.