

绿光收发一体式集成光电子芯片的脉搏检测传感器

张晨辰, 高绪敏, 叶子琪, 柏明明, 胡泽锋, 王永进

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 光学体积描记 (PPG, photo plethysmo graphy) 因其设计简单、成本低、信号周期能有效反应心脏节律等特点被广泛应用于检测心率及脉搏活动。基于多量子阱 (MQW, multiple quantum well) 二极管发光谱与探测谱存在重叠区的物理现象, 采用兼容工艺在一块氮化镓芯片上实现光发射和接收器件的集成, 研制收发一体式集成光电子芯片及脉搏传感器。实验结果表明, 该氮化镓集成光电子芯片能够有效地接收经过心脏脉冲调制过的反射光。结合电路处理, 能够根据还原的 PPG 信号计算出测试者的心率及脉搏跳变频率, 以此起到检测和警示的作用。

关键词: 光学体积描记; 脉搏检测传感器; 单片氮化镓集成光电子芯片

中图分类号: TN91

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00319

Pulse detection sensor with green light transceiver integrated optoelectronic chip

ZHANG Chenchen, GAO Xumin, YE Ziqi, BO Mingming, HU Zefeng, WANG Yongjin

School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: Photo plethysmo graphy (PPG) is widely used to detect heart rate and pulse activity due to its simple design, low cost, and signal cycle that can effectively reflect the heart rhythm. Owing to the partial overlap between the emission and the detection spectra of GaN multiple quantum well (MQW) diode, the MQW receiver can respond to the light emitted from the transmitter sharing identical MQW structures. Thus, the fabricate and characterize monolithic integration of GaN transmitter and receiver was proposed as a single unit onto a conventional GaN-on-sapphire platform. This not only can effectively reduce the size and cost of the device, but also fully improves the sensitivity of the system. The experimental results show that the gallium nitride integrated optoelectronic chip can effectively receive the reflected light modulated by the heart pulse. Combined with circuit processing, the tester's heart rate and pulse beat frequency can be calculated according to the restored PPG signal, so as to play the role of detection and warning.

Key words: photo plethysmo graphy, pulse detection sensor, monolithic integration of GaN optoelectronic chip

0 引言

心率是人体最基本也是最重要的生命特征, 它反映人体健康水平, 更与人的心脏疾病密切相关, 因此心率检测成为了解身体健康的重要手段^[1-4]。应用于生理参数测量的光学体积描记 (PPG, photo

plethysmo graphy)^[5]是借助光电手段检测血液容积变化的一种无创检测方法^[6]。PPG 信号的组成部分如图 1 所示, 在保持测试部位稳定不动的情况下, 皮肤、骨骼、静脉血液等人体组织对光的吸收量是基本不变的, 而动脉因其中存在血液的脉动行为, 从而对光的吸收量时刻发生着变化^[7]。同时, 多量

收稿日期: 2022-04-19; 修回日期: 2022-10-08

通信作者: 王永进, wangyj@njupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2022YFE0112000); 国家自然科学基金资助项目 (No.U21A201550)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFE0112000), The National Natural Science Foundation of China (No.U21A201550)

子阱 (MQW, multiple quantum well)^[8] 二极管具备的发光探测共存现象逐渐进入人们的视野^[9]。一方面, 电子注入 MQW 二极管时, 器件发光, 实现光电转换; 另一方面, MQW 二极管能够探测感知光, 激发电子空穴对生成光电流, 实现光电能量及信息转换^[10]。本文基于氮化镓 (GaN) MQW 二极管的发光谱与探测谱重叠现象, 采用兼容制造工艺在同一块芯片上集成光发射与接收器件, 并以此设计实现收发一体式绿光脉搏检测传感器。这比传统发射器-介质-探测器模式更加简洁并且探测效率更高。同时将信号的处理和显示集成在一块印制电路板 (PCB, printed circuit board) 上, 实现设备的小型化, 利于在日常生活中携带使用。

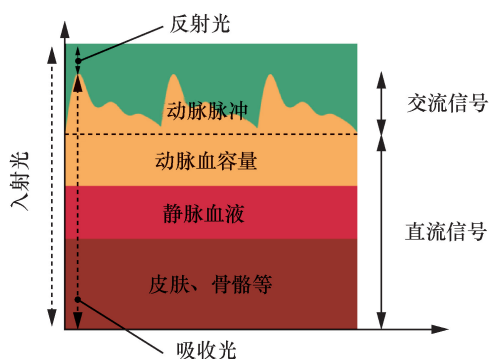


图1 PPG 信号的组成部分

本文从最基本的电流-电压 (I-V, current-voltage) 特性曲线着手对此芯片的性能进行测量, 分别对其光电特性、外量子效率^[11]、电致发光 (EL, electroluminescence) 谱^[12]、响应光谱^[13]等进行数据分析。同时基于相关研究^[14-18], 以绿光作为光源, 搭建测试平台, 测试其代替光电探测器接收生物光信号的能力。此外, 因为庞宇等^[19]使用传统袖套式方法检测心率脉搏的研究具有操作复杂等不利因素^[20-21], 所以设计通过从人体手部提取相关生物信号, 实现对脉搏信号的检测与显示。

1 芯片的结构与性能分析

1.1 芯片的制备与物理表征

氮化镓是关键的第三代半导体材料之一^[22]。芯片的制备如图2所示, 图2(a)为采用蓝宝石氮化镓晶圆制备氮化镓集成光电子芯片详情图。其中制备的主要流程如下。

步骤1 首先, 将蓝宝石衬底减薄并抛光至 $200\ \mu\text{m}$ 的厚度; 其次, 使用光刻技术定义台面区域, 并通过使用混合着 Cl_2 和 BCl_3 的电感耦合等离子体 (ICP,

inductively coupled plasma)^[23] 将其蚀刻至 $1.4\ \mu\text{m}$ 的深度; 然后, 进一步进行深度 ICP 蚀刻, 从而完全蚀刻 III 族氮化物的外延层, 实现器件之间的隔离; 接着, 采用溅射法沉积 $230\ \text{nm}$ 厚的透明氧化铟锡 (ITO, indium tin oxide) 电流扩散层, 并将芯片在氮气中快速热退火 $7\ \text{min}$; 最后用 HCl/FeCl_3 的混合物蚀刻 ITO 层, 使 n-GaN 表面表露出来。

步骤2 进而将 Ni/Al/Ti/Pt/Ti/Pt/Au/Ti/Pt/Ti 金属沉积在 n-GaN 和 ITO 表面, 进行金属剥离和快速热退火。

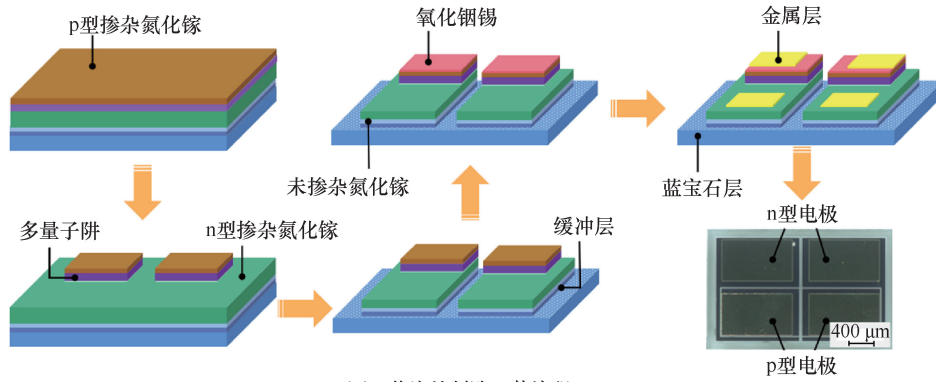
步骤3 通过等离子体增强化学气相沉积 (PECVD, plasma enhanced chemical vapor deposition)^[24] 在晶圆上沉积 $1\ 000\ \text{nm}$ 厚的 SiO_2 层。然后通过光刻确定键合区域, 使用电子束蒸发 (EBE, electron beam evaporation)^[25] 沉积 Ni/Al/Ti/Pt/Ti/Pt/Au 电极垫, 接着对其进行金属剥离和快速热退火。

步骤4 用紫外纳秒脉冲激光切割晶圆, 分离出尺寸为 $1.5\ \text{mm} \times 2.5\ \text{mm}$ 、质量为 $9\ \text{mg}$ 的小芯片。

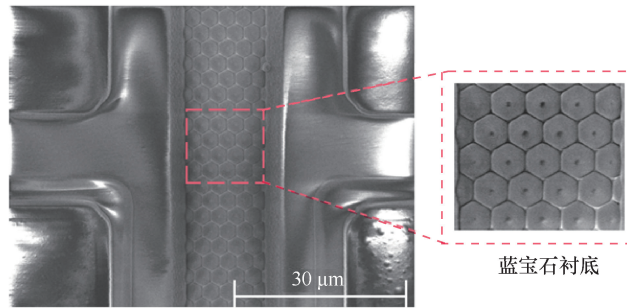
图2(b)为集成光电子芯片的扫描电子显微镜图, 放大区域为蓝宝石图形化衬底。III族氮化物外延层薄膜在此基板上生长, 以解决氮化镓与蓝宝石晶格常数之间的不匹配问题^[26-27]。图2(c)为此集成光电子芯片原子力显微镜 (AFM, atomic force microscope) 图像, 可见III族氮化物外延层被完全蚀刻, 形成 $20\ \mu\text{m}$ 的电隔离沟槽^[28] (其中深色区域为蓝宝石衬底)。

1.2 芯片的性能分析

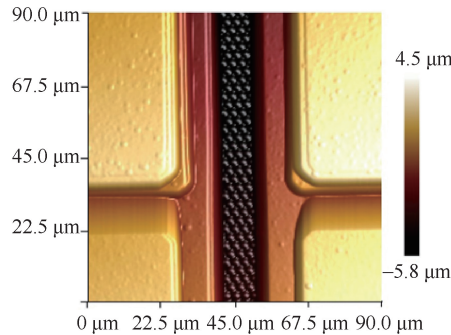
芯片基础性能测试如图3所示, 图3(a)显示了该芯片的典型 I-V 曲线。MQW 二极管在有外部光照的情况下, 吸收光源发出的光子, 进行光电转化, 产生光电流, 因此测量的电流是驱动电流和光电流的总和。不同恒流激励下 LED 光电特性如图3(b)所示, 分别用 $7\ \text{mA}$ 、 $9\ \text{mA}$ 、 $11\ \text{mA}$ 的恒流驱动一个 MQW 二极管作为发射器, 在此条件下, 测量另一个未被驱动的 MQW 二极管作为光电二极管 (PD, photoelectric diode) 探测所产生的光电流。同时在该芯片上方 $5\ \text{mm}$ 处水平放置一面反射镜, 进行对比实验, 可见相同激励下光电流明显增加。此外, 传统的硅基芯片在进行光源、光波导和光探测器集成时, 国内外通常都采用复杂的生长技术进行异质集成, 这样的方法不但工艺复杂, 而且成本高、光耦合效率低、通信速率慢, 而此收发一体式光电子芯片因其最大的优势——同质集成, 从而巧妙地弥补了传统硅



(a) 芯片的制造工艺流程



(b) 芯片的电镜图



(c) 芯片的AFM图

图 2 芯片的制备

基芯片的不足。又当正向偏置电压达到 2.34 V、电流为 36 mA 时，芯片的外部量子效率达到峰值 17.99 %，如图 3(c)所示。同时，处于发光模式时，芯片在 80 mA 恒流驱动下，其电致发光谱在 522 nm 波长处达到顶峰；处于光探测模式时，芯片在 0 V 偏置电压下，其探测谱在波长为 385 nm 处达到峰值，如图 3(d)所示。正是斯托克斯频移^[29]的存在，使得发光谱与探测谱峰值之间存在约 137 nm 的波长差。此外，随着波长的增加，探测谱响应率逐渐减少可归因于 MQW 的量子限制斯塔克效应（QCSE, quantum confined stark effect）和 In 波动引起的拖尾效应^[30]。

光电子芯片的发光探测性能测试如图 4 所示，为验证此芯片作为 PD 检测外部调制光信号的能力，

搭建如图 4(a)所示的测试平台。测试时，使用 Keysight 33600 A 系列信号发生器给外部光源提供伪随机二进制序列信号。当施加的信号传输速率分别为 50 bit/s、100 bit/s 时，对应的 PD 测试电压变化如图 4(b)、图 4(c)所示，可见当信号的传输速率越高时，PD 测试电压波形畸变越严重。但是，鉴于人体心率及脉搏信号通常维持在几赫兹之间，因此该芯片作为 PD 使用时可以较好地捕获生物信号的变化。此外，点亮接收器的另一个 MQW 二极管时，可见 PD 测试电压只是单纯地在原有的基础上叠加了一个直流偏置量，其测试电压波形畸变程度基本不受影响。基于以上实验的可行性，当使用该芯片分别作为信号发射器和信号接收器时，在直流 2.4 V 偏置驱动其中一个 MQW 二极管的情况下，接收器在一定距离

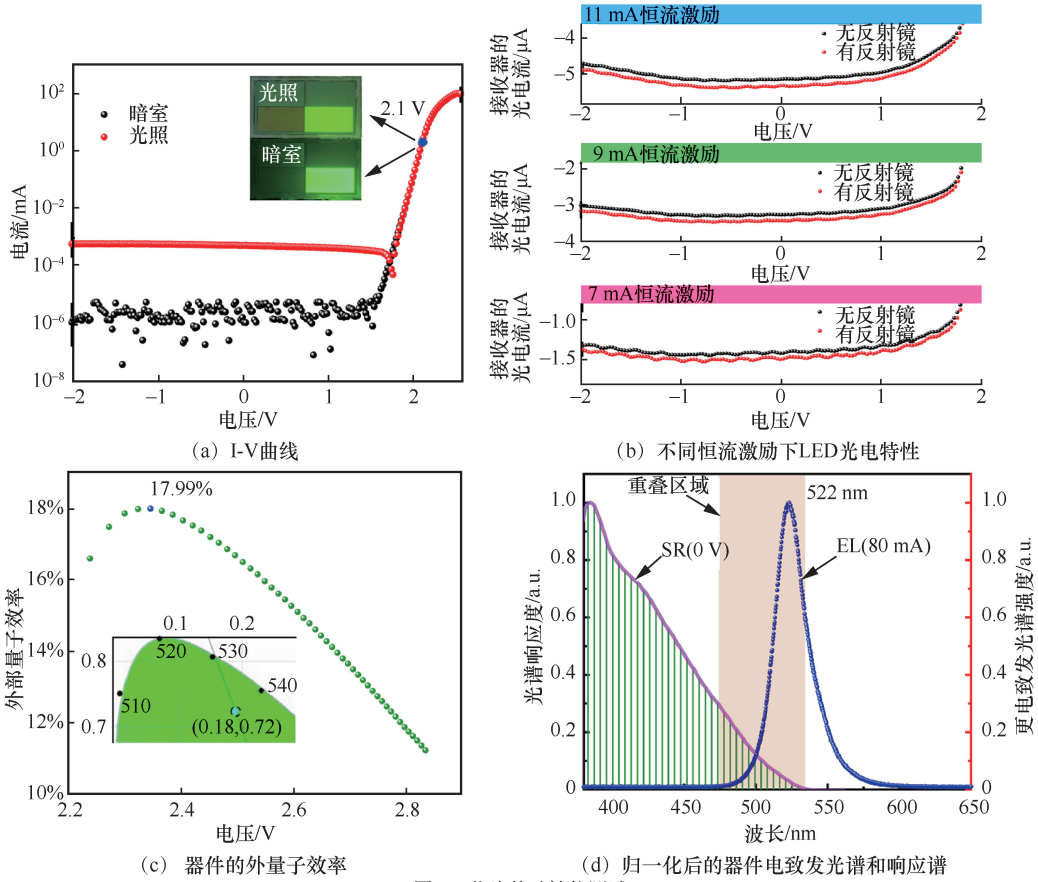
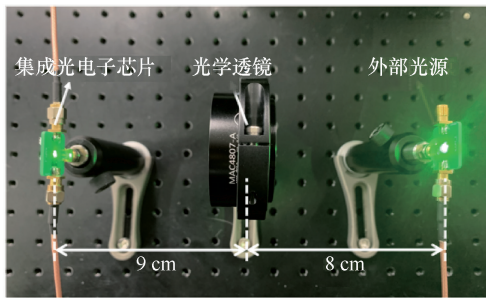
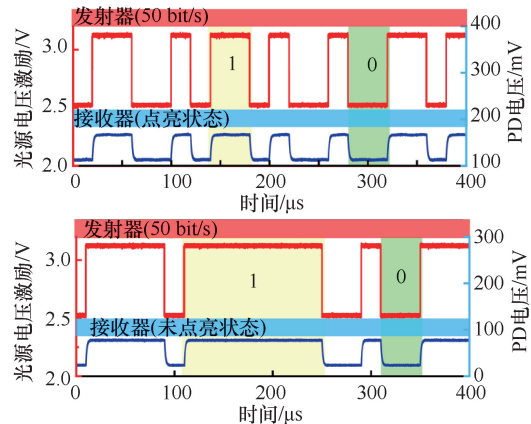


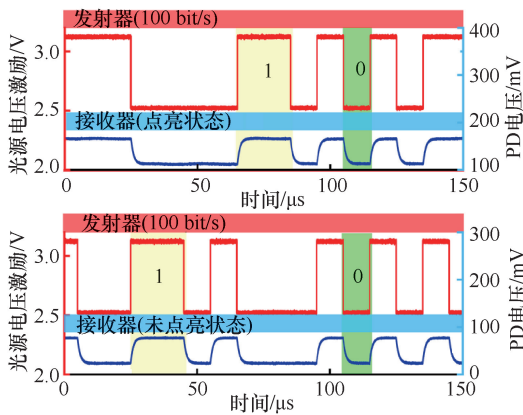
图3 芯片基础性能测试



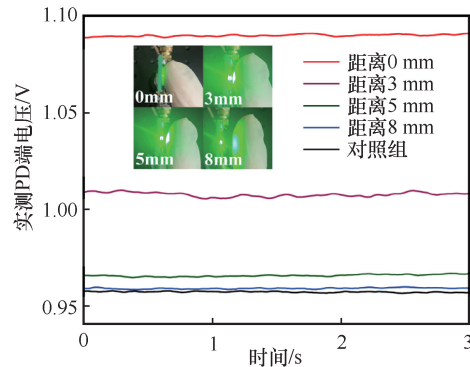
(a) 验证PD接收外部调制光的测试平台



(b) 50 bit/s下PD测试电压变化



(c) 100 bit/s下PD测试电压变化



(d) 不同距离下芯片的发光探测性能

图4 光电子芯片的发光探测性能测试

内对指尖调制反射回来的光敏感，如图 4(d)所示。此外，若使用同等强度的红光作为光源时，皮肤、骨骼等对于红光的吸收程度远远小于绿光，从而导致接收端信噪比降低。

2 系统的搭建与测试

2.1 系统的搭建

基于收发一体式心率及脉搏传感器系统如图 5 所示，展示了基于 GaN 的绿光收发一体式集成光电子芯片组成的一个集检测和显示为一体的心率及脉搏传感器。发射端的光源信号经过血管床调制后反射至芯片接收端，光电转换后此电信号再经过一系列的跨阻放大、滤波处理，传入 STM32 处理器，该处理器对此模拟信号进行模数转化，将此信号转化成数字信号，随后处理器根据设定的阈值对此数字信号进行判决，接着处理器根据设定算法计算出每分钟的脉搏跳变频数。同时将系统采样频率设

置为 1 000 Hz，以减小系统的输出误差。最后通过串行外设接口 (SPI, serial peripheral interface) 协议，将此数值传输并显示到集成在此传感器上的有机发光二极管 (OLED, organic light-emitting diode) 显示屏上。

2.2 系统的测试

基于收发一体式心率及脉搏传感器系统的测试如图 6 所示，经过一系列的信号处理后，系统可以清楚地还原出脉搏信号，如图 6(a)所示。当输入电流从 40 mA 增加到 80 mA 时，输出的 PPG 信号振幅范围从 120 mV 增加到了 176 mV，如图 6(b)所示。这样的振幅范围也足够让 STM32 处理器对其进行捕获和模数转化。同时，相较于市面上同等绿光心率及脉搏传感器而言，此收发一体式光电子芯片的工作电流几乎是它们的 10 倍。这意味着接收端可以接收更加可靠的、信噪比更高的脉搏信号。此外，系统的封装结构如图 6(c)、图 6(d)所示。

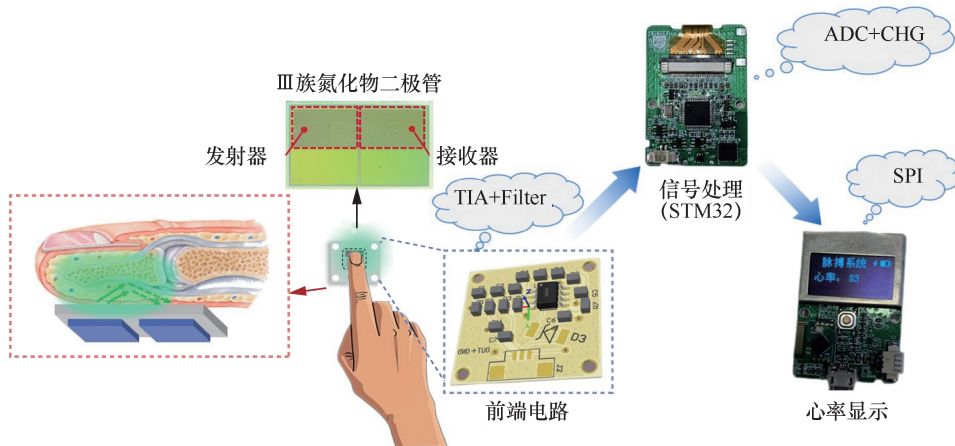


图 5 基于收发一体式心率及脉搏传感器系统

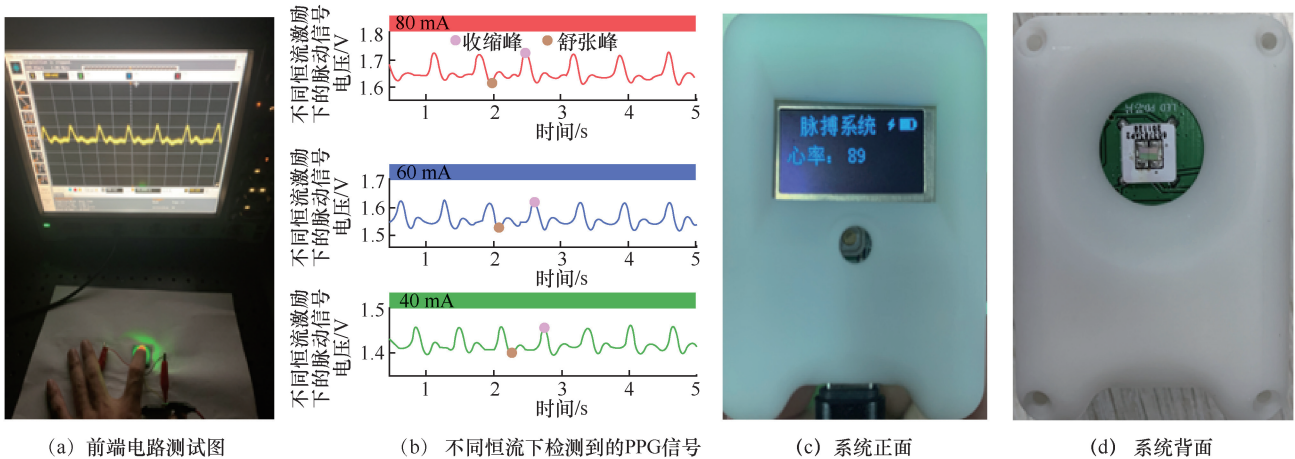


图 6 基于收发一体式心率及脉搏传感器系统的测试

3 结束语

本研究基于 MQW 二极管发光谱与探测谱存在重叠区的物理现象,采用兼容制造工艺,在一块氮化镓芯片上实现光发射和接收器件的集成,研制出心率及脉搏传感器。结果表明,该氮化镓光电集成传感器能够有效提高系统的集成度和灵敏度,降低系统的开发难度和成本,并能满足对心率及脉搏的健康监测需求。

参考文献:

- [1] 肖剑,董威,邵强,等.基于心脏信号生物识别综述[J].计算机应用与软件,2021,38(11):131-140,166.
XIAO J, DONG W, SHAO Q, et al. A survey of biometrics based on cardiac signals[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(11): 131-140, 166.
- [2] AGRAFIOTI F, HATZINAKOS D. ECG based recognition using second order statistics[C]//Proceedings of 6th Annual Communication Networks and Services Research Conference (CNSR 2008). Piscataway: IEEE Press, 2008: 82-87.
- [3] SAHAYADHAS A, SUNDARAJ K, MURUGAPPAN M. Detecting driver drowsiness based on sensors: a review[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2012, 12(12): 16937-16953.
- [4] RAJPURKAR P, HANNUN A Y, HAGHPANAHI M, et al. Cardiologist-level arrhythmia detection with convolutional neural networks[EB]. 2017.
- [5] 刘晨沁,袁思念,林高藏,等.基于 PPG 信号的呼吸监测系统的研制[J].中国医疗器械杂志,2022,46(4):368-372.
LIU C Q, YUAN S N, LIN G Z, et al. Development of respiratory signal monitoring system based on photoplethysmography[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2022, 46(4): 368-372.
- [6] 周亮,余江军,刘朝晖,等.皮肤组织容积脉搏波 400~1000 nm 光谱特性仿真研究[J].光谱学与光谱分析,2020,40(4):1071-1075.
ZHOU L, YU J J, LIU Z H, et al. Simulation study on spectral characteristics of skin tissue and volume pulse wave in 400-1 000 nm wavelength[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(4): 1071-1075.
- [7] 王永嘉,杨旭,李金钗,等.基于 GaN 微米阵列结构的单芯片白光 LED 有源区 InGaN/GaN 多量子阱结构设计[J].发光学报,2022,43(7):1130-1138.
WANG Y J, YANG X, LI J C, et al. Design of InGaN/GaN MQWs structures for monolithic phosphor-free white LEDs based on GaN-micro-arrays[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2022, 43(7): 1130-1138.
- [8] 付令,赵智慧,侯蕊.绿光光电容积脉搏波测量生理参数的校准技术[J].上海计量测试,2021,48(1):44-46.
FU L, ZHAO Z H, HOU R. A study for calibration of physiological parameters measurement by green light photoplethysmography[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2021, 48(1): 44-46.
- [9] 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.
WANG Y J, FU K, WANG L N. Optical interconnection scheme based on visible light communication technology[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020, 40(5): 134-140.
- [10] 王永进,章燕,高绪敏,等.亚波长理想 LED 模型及实验实现[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2019,39(2):1-5.
WANG Y J, ZHANG Y, GAO X M, et al. Subwavelength perfect LED architecture and experimental realization[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019, 39(2): 1-5.
- [11] 杨杭,黄文俊,张胡梦圆,等. GaN 基 Micro-LED 的外量子效率研究[J].半导体光电,2022,43(3):522-528.
YANG H, HUANG W J, ZHANG H M Y, et al. Investigation of external quantum efficiency of GaN-based micro-LEDs[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(3): 522-528.
- [12] 陈志忠,徐科,秦志新,等. InGaN/GaN 多量子阱 LED 电致发光谱中双峰起源的研究[J].半导体学报,2007,28(7):1121-1124.
CHEN Z Z, XU K, QIN Z X, et al. Origins of double emission peaks in electroluminescence spectrum from InGaN/GaN MQWLED[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28(7): 1121-1124.
- [13] 易淋凯,黄佳琳,周梅,等. GaN 基 p-i-n 和肖特基紫外探测器的响应光谱及暗电流特性[J].发光学报,2017,38(10):1327-1331.
YI L K, HUANG J L, ZHOU M, et al. Spectral response and dark current of p-i-n type and Schottky barrier GaN-based ultraviolet detectors[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(10): 1327-1331.
- [14] XU L, GAO K P. Continuous cuffless arterial blood pressure measurement based on PPG quality assessment[J]. International Journal of Computational Biology and Drug Design, 2015, 8(2): 150.
- [15] SAYADI O, SHAMSOLLAHI M B. Utility of a nonlinear joint dynamical framework to model a pair of coupled cardiovascular signals[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2013, 17(4): 881-890.
- [16] CHOI Y, ZHANG Q, KO S. Noninvasive cuffless blood pressure estimation using pulse transit time and Hilbert-Huang transform[J]. Computers & Electrical Engineering, 2013, 39(1): 103-111.
- [17] MADHAV K V, RAM M R, KRISHNA E H, et al. Robust extraction of respiratory activity from PPG signals using modified MSPCA[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(5): 1094-1106.
- [18] 邹滋润,陈真诚,朱健铭.基于光电容积脉搏波的呼吸波提取[J].中国生物医学工程学报,2013,32(4):508-512.
ZOU Z R, CHEN Z C, ZHU J M. Extraction of respiratory wave from photoplethysmography signals[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2013, 32(4): 508-512.
- [19] 庞宇,周兴悦,陈亚军.适用监护场景的体征参数测量系统设计[J].现代电子技术,2020,43(24):55-59.
PANG Y, ZHOU X Y, CHEN Y J. Design of physical sign parameter detection system for monitoring scene[J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(24): 55-59.
- [20] 赵振名,刘永新,高雪,等.智能人体参数检测仪的设计与开发[J].电子测试,2020(7):23-24.
ZHAO Z M, LIU Y X, GAO X, et al. Design and development of

intelligent human body parameter detector[J]. Electronic Test, 2020(7): 23-24.

- [21] 郭海亮, 王骥, 刘诗恒, 等. 可穿戴式人体健康多参数检测系统的研究[J]. 电子世界, 2017(16): 19-22.

GUO H L, WANG J, LIU S H, et al. Research on wearable human health multi-parameter detection system[J]. Electronics World, 2017(16): 19-22.

- [22] 冯晨, 曾开文, 孙浩, 等. 氮化镓半导体材料通信电源应用[J]. 电信工程技术与标准化, 2021, 34(7): 20-23.

FENG C, ZENG K W, SUN H, et al. Application of GaN semiconductor material in communication power supply[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2021, 34(7): 20-23.

- [23] MA R L, MCLEOD C W, TOMLINSON K, et al. Speciation of protein-bound trace elements by gel electrophoresis and atomic spectrometry[J]. Electrophoresis, 2004, 25(15): 2469-2477.

- [24] 龙长林, 吴限, 陈国钦, 等. PECVD 法制备 SiO₂ 膜均匀性研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(10): 1348-1351.

LONG C L, WU X, CHEN G Q, et al. Research of thickness uniformity of SiO₂ deposited by PECVD[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(10): 1348-1351.

- [25] 陆中丹. 电子束蒸发沉积掺杂 TiO₂ 薄膜的结构控制及其性质研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.

LU Z D. Study of the structure and photocatalytic activity of doping-TiO₂ thin films deposited by electron beam evaporation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.

- [26] LEE Y J, HWANG J M, HSU T C, et al. Enhancing the output power of GaN-based LEDs grown on wet-etched patterned sapphire substrates[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(10): 1152-1154.

- [27] LEE J H, OH J T, KIM Y C, et al. Stress reduction and enhanced extraction efficiency of GaN-based LED grown on cone-shape-patterned sapphire[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(18): 1563-1565.

- [28] 李佳, 梁静秋, 金霞, 等. GaAs-LED 阵列器件隔离沟槽的制备研究[J]. 光电子技术, 2006, 26(4): 246-249.

LI J, LIANG J Q, JIN X, et al. The fabrication of isolation grooves of LED arrays on the GaAs[J]. Optoelectronic Technology, 2006, 26(4): 246-249.

- [29] 林绍杰, 丁双红, 张骏, 等. 斯托克斯光种子法固体相干反斯托克斯拉曼频移器的理论研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(7): 107-112.

LIN S J, DING S H, ZHANG J, et al. Theoretical research on coherent anti-stokes Raman shifters of stokes seed method in Raman crystals[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(7): 107-112.

- [30] 周砚扬. 硅基单端推挽式驱动载流子耗尽型电光调制器芯片研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.

ZHOU Y Y. Study on silicon-based single-drive push-pull carrier-depletion electro-optical modulator chips[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.

[作者简介]



张晨辰(1998-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无线光通信系统。



高绪敏(1991-), 女, 南京邮电大学通信与信息工程学院讲师、硕士生导师, 主要研究方向为无线光通信与关键器件。



叶子琪(1996-), 女, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无线光通信系统。



柏明明(1995-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无线光通信系统。



胡泽锋(1998-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无线光通信系统。



王永进(1977-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院教授、博士生导师, 高等学校学科创新引智基地和全国高校黄大年式教师团队负责人、国家优秀青年科学基金获得者, 荣获“全国归侨侨眷先进个人”称号, 江苏省省委联系专家, 主要研究方向为无线光通信及集成光电子芯片。