

基于PbS量子点光电探测器的脉搏检测系统研究

李力 耿会娟 张天昊 朱建平

Research on pulse detection system based on PbS quantum dot photodetector

LI Li, GENG Hui-juan, ZHANG Tian-hao, ZHU Jian-ping

引用本文:

李力, 耿会娟, 张天昊, 朱建平. 基于PbS量子点光电探测器的脉搏检测系统研究[J]. *中国光学*, 2024, 17(5): 1236–1243. doi: 10.37188/CO.2024–0018

LI Li, GENG Hui-juan, ZHANG Tian-hao, ZHU Jian-ping. Research on pulse detection system based on PbS quantum dot photodetector[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 1236–1243. doi: 10.37188/CO.2024–0018

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

拓扑量子材料光电探测器研究进展

Recent progress and prospects of topological quantum material–based photodetectors

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 43 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0096>

基于AsP/MoS₂异质结的偏振光电探测器

A polarization–sensitive photodetector based on a AsP/MoS₂ heterojunction

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 135 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0189>

光损伤肖特基钙钛矿探测器的光电特性分析

Analysis of photoelectric characteristics of a light–damaged schottky perovskite detector

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 668 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0196>

面向硅基光电子混合集成的二维材料探测器

Two–dimensional material photodetector for hybrid silicon photonics

中国光学 (中英文). 2021, 14(5): 1039 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0003>

基于碳纳米薄膜/砷化镓范德华异质结的高性能自驱动光电探测器研究

High–performance self–powered photodetectors based on the carbon nanomaterial/GaAs vdW heterojunctions

中国光学 (中英文). 2022, 15(2): 373 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0149>

基于半导体性单壁碳纳米管/富勒烯异质结的高性能透明全碳光电探测器

High–performance transparent all–carbon photodetectors based on the semiconducting single–walled carbon nanotube/fullerene heterojunctions

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1243 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0243>

文章编号 2097-1842(2024)05-1236-08

基于 PbS 量子点光电探测器的脉搏检测系统研究

李力¹, 耿会娟^{2,3}, 张天昊³, 朱建平^{1*}

(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 200000;

2. 安阳师范学院物理与电气工程学院, 河南安阳 455000;

3. 上海交通大学电子信息与电气工程学院薄膜与微细技术教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 脉搏蕴含人体丰富的血流信息, 检测脉搏并推导出人体心血管系统健康状态正成为研究的热点。本文利用热注射法合成得到尺寸为 3 nm 的 PbS 量子点, 在金叉指电极表面通过旋涂的方法构筑 PbS 量子点光电探测器。基于已制备的 PbS 量子点光电探测器研制了数据可视化的脉搏检测系统。运用光电容积脉搏波描记法, 对同一测试者不同运动状态以及不同测试者同一运动状态进行测量, 经过电路处理将测得的数据显示在电子显示屏上。结果表明, 探测器在 $15.2 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 光强度照射下, 其响应度 (R) 和探测率 (D^*) 在 -3 V 偏压下分别为 0.33 A/W 和 $1.33 \times 10^{12} \text{ Jones}$ 。将其应用于测量脉搏电路中, 系统能够有效接收并测得人体脉搏信号。上述结果表明基于 PbS 量子点光电探测器的脉搏检测系统在灵敏度、稳定性以及可靠性均满足应用要求。

关键词: 硫化铅量子点; 光电探测器; 光电容积脉搏波描记法; 脉搏波测量

中图分类号: TP212.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0018

Research on pulse detection system based on PbS quantum dot photodetector

LI Li¹, GENG Hui-juan^{2,3}, ZHANG Tian-hao³, ZHU Jian-ping^{1*}

(1. School of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 200000, China;

2. School of Physics & Electrical Engineering, Anyang Normal University, Anyang 455000, China;

3. Key Laboratory for Thin Film and Microfabrication Technology (Ministry of Education), School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

* Corresponding author, E-mail: jp-zhu@shou.edu.cn

Abstract: As the pulse contains rich blood flow information of the human body, detecting the pulse and deducing the health status of human cardiovascular system are becoming a hot spot. In this study, PbS quantum dots with a size of 3 nm were synthesized using the hot injection method, and a PbS quantum dot photodetector was constructed on the surface of gold forked finger electrode through spin coating. Based on the pre-

收稿日期: 2024-01-17; 修订日期: 2024-02-22

基金项目: 上海市自然科学基金 (No. 19ZR1426900); 上海交通大学深蓝计划 (No. SL2020MS001); 河南省科技攻关项目 (No. 242102240050)

Supported by the Shanghai Natural Science Foundation (No. 19ZR1426900); Shanghai Jiao Tong University Deep Blue Program (No. SL2020MS001); Henan Province Science and Technology Research Project (No. 242102240050)

pared PbS quantum dot photodetector, a data visualization pulse detection system was developed. Using the optoelectronic capacitance pulse wave recording method, the same tester was measured under different exercise states and different testers were measured under the same exercise state. The measured data was displayed on the electronic display screen through circuit processing. The results show that under the illumination of $15.2 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ light intensity, its responsivity (R) and light detection rate (D^*) are 0.33 A/W and 1.33×10^{12} Jones under -3 V bias voltage, respectively. When used in a pulse measurement circuit, the system can effectively receive and measure the human pulse signal. It can be concluded that the pulse detection system based on the PbS quantum dot photodetector meets the application requirements regarding sensitivity, stability, and reliability.

Key words: PbS QDs; photoelectric detector; photoplethysmography; pulse detection sensor

1 引言

脉搏是人体最重要的生命特征之一,与人的心脏密切联系。通过对脉搏的测量,人们能对自身健康水平有初步的评估,更能由此提前预防动脉硬化、高血压、心力衰竭等心血管疾病^[1-2]。传统的脉搏测量方法如有创测量、袖带测量等,这些检测方式不仅需要在特定环境下进行,还会对患者身体造成短期的、持续的伤害^[3]。由于传统脉搏检测方法存在一系列问题,因此无创式、便携式脉搏检测系统逐步发展起来。人体手指端具有血管丰富、动脉成分含量高的优点,通过手指指端可以轻松获取血流信息。因此,检测指端的便携式脉搏测试系统近些年来备受关注。其中,大多为基于指压式透射式的脉搏检测系统^[4-7]。但是指压式和透射式脉搏检测作为传统的脉搏测量方法,需要配备特定形状的支架且其重塑性低而逐渐被诸如智能手表等便携式智能系统淘汰。如今,反射式脉搏检测系统因具有可塑性高、占用空间小等优点而被用于便携式智能系统。

便携式脉搏测量系统的性能取决于系统光源的选择和高性能传感器。首先,光源的选择对精确测量脉搏来说尤为重要。目前反射式脉搏检测系统大多都选择近红外光作为光源。通过实际测量发现,采用近红外光测量有以下不足^[8-10]: (1)近红外光比较容易被皮肤的黑色素吸收,影响测量结果; (2)人体组织内的红细胞对近红外光的吸收度不高; (3)受人体环境的影响,近红外光的反射幅值比较低。因此,虽然近红外光在脉搏检测中表现良好,但仍不是最优的选择,我们需要寻找更为合适的光源作为脉搏测试系统的光源。相较于

于近红外光,绿光受皮肤、骨骼等干扰较小,且接收端信噪比更低^[11]。研究发现,在波长为 $400\sim 800 \text{ nm}$ 的光照射时,手指端的透射比为零。分析血液的透射比曲线与手指端的透射比曲线,发现二者的斜率变化极其相似,并且透射比曲线在 415 nm 、 542 nm 和 578 nm 时有 3 个吸收峰,其中 415 nm 和 542 nm 处波谷十分明显。考虑到 415 nm 属于蓝紫光范围,黑色素等物质对光的吸收会导致反射出的光强极其微弱,不便于信号采集。人体血液透射比曲线大约在 $515\sim 560 \text{ nm}$ 处存在吸收峰,且 542 nm 处于吸收波谷底端,测试光源波长越靠近 542 nm ,人体对其的透射比曲线越低,反射效果越好^[12]。

实现精确的脉搏检测除了要有合适的光源外,性能优秀的光电探测器也极为重要。目前用于脉搏检测的光电探测器,材料多是基于传统的无机半导体,如硅等,其响应度 (R) 约为 25.11 mA/W ,探测率 (D^*) 约为 1.03×10^{10} Jones^[13]。由于晶硅是间接带隙半导体,受到晶格周期势场的作用,电子的能量动量关系比较复杂,这限制了其光学性能。相较于传统的半导体材料,量子点 (quantum dots, QDs) 作为一种具有独特光电性质的新型半导体纳米晶材料,因其吸收光谱宽、吸收系数高、溶液加工性好、制造成本低、尺寸可调等优点而受到广泛关注^[14-16]。近些年基于量子点光电探测器的研究也取得了丰硕成果。Tang 等^[17] 人采用 CsPbBr_3 QDs 和 ZnO 纳米线 (nanowires, NWs) 构筑了双层结构的光电探测器,得益于高密度和均匀性的表面形态, CsPbBr_3 QDs 改善了 ZnO 纳米线的暗电流,使探测器在 520 nm 光照射下的探测率达到了 1.75×10^{13} Jones; Tetsuk^[18] 制备了以氮化硼纳米片 (BN-NSs) 为缓冲层的石墨烯/氮功能化

石墨烯量子点(NGQD)混合宽带的光电探测器, 氮化硼纳米片作为缓冲层防止光激发载流子在石墨烯/氮功能化石烯量子点层的界面处复合, 并促进光生电子从氮功能化石烯量子点层到石墨烯的传输, 提高了探测器的光电性能, 结果显示其在 532 nm 波长光下的探测率达到了 7×10^{13} Jones; Dong 等^[19] 制备了一种 PbS: 聚 3-己基噻吩: 苯基-C₆₁-丁酸甲酯: ZnO 结构的光电探测器, 器件在 500 nm 处的响应度和探测率分别为 1.01 A/W 和 1.01×10^{12} Jones; 许俊峰等^[20] 制备了 PbS-四丁基碘化铵 (TBAI) 旋涂层数为 6 层的器件, 其在 500 nm 激光照射下探测率达到 1.38×10^{11} Jones。诸多研究表明, 基于量子点的光电探测器在可见光下具备优异的光学性能。但是, 利用量子点光电探测器检测脉搏的研究还未见报道。

PbS 量子点相较于其他量子点材料更易制备。另外, 由于其具有带隙可调、可溶液加工、吸收系数高、低成本合成、多衬底兼容等优异特性, 能满足下一代光电探测器的低成本、高性能、常温工作等需求^[21-22], 是制备光电探测器的优异材料。本文创新性地基于 PbS 量子点光电探测器, 研制了数据可视化的脉搏检测系统。采用热注射法得到尺寸为 3 nm 的 PbS 量子点, 通过旋涂法制备了 PbS 量子点光电探测器。运用扫描电子显微镜和半导体参数分析仪对器件形貌和性能进行分析。完成与器件匹配的前端电路, 研制出数据可视化的脉搏检测系统, 并将制备完成的器件运用在脉搏检测系统中, 测量不同测试者同一运动状态和同一测试者不同运动状态下的脉搏。研究发现基于 PbS 量子点光电探测器的脉搏检测系统在灵敏度、稳定性以及可靠性均满足脉搏检测要求。这为量子点的应用拓宽了方向。

2 实验部分

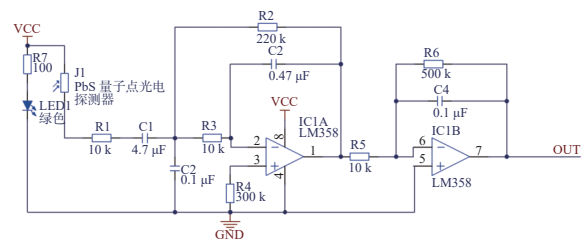
2.1 器件构筑

在四英寸的 SiO₂/Si 晶圆上利用设计好的叉指电极的掩模版进行紫外曝光, 利用电子束蒸发蒸镀 200 nm 的金电极, 制备出所需的叉指电极。其中沟道长度为 10 μm, 电极对数为 10 对, 器件的有效面积为 0.0032 cm²。本研究采用具有低成本优势的热注射法^[23] 得到尺寸为 3 nm 的 PbS 量子点, 通过旋涂法在金叉指电极上制备 PbS 量子

点光电探测器。制备步骤如下: 首先取 50 mg PbS 量子点放于 1 mL 氯仿中, 将其配置成 50 mg/ml 的溶液, 将溶液超声 30~45 min 后在 4 °C 下保存。然后, 将制备好金叉指电极的硅片放置在旋涂机中, 设置旋涂机的参数为前 5 秒 1000 转, 后 30 秒 3000 转。随后旋涂机进行吸片, 用移液枪取 8 μL 配置好的 PbS 溶液竖直滴在电极上, 开启旋涂机。待上步结束后, 吸片用移液枪取四丁基碘化铵 (TBAI) 甲醇溶液 10 μL 竖直滴在电极上, 等待 30 秒让其与 PbS 量子点进行配体交换后旋涂机再次进行吸片。吸片后用移液枪取 10 μL 甲醇溶液竖直滴在电极上, 开启旋涂机, 将多余配体清洗掉。重复以上步骤 3 次。随后将器件放置真空干燥箱设置 60 °C 烘干 60 分钟, 制备成 PbS 量子点光电探测器。

2.2 可视化脉搏检测系统研制

可视化脉搏检测系统包括光源、前端电路、电压比较器、STM32 最小系统板和电子显示屏。由于 542 nm 波长的 LED 灯需要定制, 成本过高, 考虑到 532 nm 处于 515 nm~560 nm 波长范围底部, 且 532 nm 波长 LED 成本更低, 所以本文使用 532 nm 波长的 LED 作为探测光源。其中前端电路设计如图 1 所示。通过调研得知人体运动后脉搏最高跳动次数约为 240 次/分钟, 即最高频率为 4 Hz, 基于此, 设计低通滤波放大器, 其中 C₂、C₃、R₂、R₃ 决定转折频率, R₂、R₁ 决定放大倍数。根据二阶低通滤波器的传递函数算出转折频率为 7.7 Hz, 符合脉搏检测需求。将 PbS 量子点光电探测器焊接在电路中, 绿光光源信号经过血管后反射到器件上, 器件接收到的光信号经过滤波、运放等处理后通过电压比较器传入 STM32 单片机, 处理器经模数转换后对接收到的数字信号进行判定, 计算出脉搏的跳变频率和次数。通过串行外设接口协议 (serial peripheral interface, SPI), 将此数值传输显示到电子显示屏上。



2.3 测试与表征

使用扫描电子显微镜 (SEM)(Zeiss Ultra Plus) 对 PbS 量子点光电探测器表面形貌进行表征。利用半导体参数分析仪 (KEYTHLEY 2450 SourceMeter) 在室温下对器件的光电性能进行评价。利用功率可调的 532 nm 波长的单色激光二极管作为光信号源进行照射, 测量器件的电流-电压 (I-V) 曲线和电流-时间 (I-T) 曲线。运用基于 PbS 量子点光电探测器的脉搏检测系统测量同一测试者不同运动状态以及不同测试者同一运动状态的脉搏变化。

3 分析与讨论

3.1 器件性能分析

图 2(a) 为所制备的材料 XRD 图, 将测得曲线与标准 PDF 卡片做对比, 特征峰分别对应 PbS 的晶面 (111、200、220、311、222、400、420), 由此说明本文成功制备了 PbS 量子点。PbS 量子点的 TEM 图如图 2(b) 所示, 从图中能够明显看出 PbS 量子点的大小较为均匀。通过对图中 PbS 量子点的直径进行随机选取测量, 并进行数据统计, 计算出所制备的 PbS 量子点直径均值为 3.1 nm, 如图 2(b) 插图所示。图 2(c) 为 PbS 量子点光电探测器的 SEM 图。图 2(d) 为 PbS 量子点光电探测器的 SEM-EDS 图。通过对 S、Pb 两种元素排布均匀度进行检测, 表明 PbS 量子点均匀旋涂在电极上, 这为其光学性能实现提供了良好的基础。

在 -3 V 偏压下, PbS 量子点光电探测器在 532 nm 光照下不同光强的 I-V 曲线如图 3(a)(彩图见期刊电子版) 所示。当照射光功率密度为 $80 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 光电流为 11.45 nA, 当照射光功率密度增加至 $9390 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 光电流变大为 242.44 nA。根据测试结果知, 照射光功率密度越高, 光电流强度就越大, 二者呈单调递增关系。这是因为照射光功率越大, PbS 量子点光电探测器产生的电流就越高, 器件表面就会生成越多的电子-空穴对。由此可知, 在 532 nm 光照下, PbS 光电探测器的光功率密度越大, 电流就越大。在 -3 V 偏压、不同光功率密度下, PbS 量子点光电探测器在 532 nm 光照下的 I-T 曲线如图 3(b)(彩图见期刊电子版) 所示。根据测试结果知, PbS

量子点光电探测器在绿光处呈现良好的周期性, 不同光功率密度的光照射下 PbS 量子点光电探测器的暗电流没有明显变化为 0.085 nA。图 3(c)(彩图见期刊电子版) 为 PbS 量子点光电探测器在 $9390 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 光功率密度下的响应时间图, 器件从未接收到光的状态转变到接收光后的响应状态之间共耗费 31.13 ms, 数据表明 PbS 量子点光电探测器对光的敏感度和响应速度都比较出色。

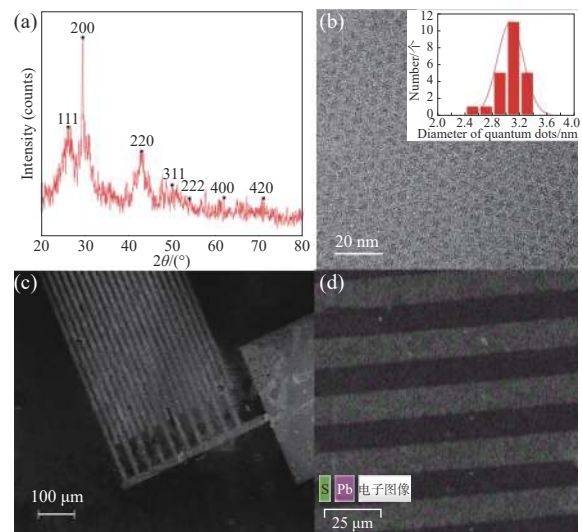


图 2 PbS 光电探测器的各项测试结果。(a) 所制备材料的 XRD 数据图; (b) PbS 量子点的 TEM 图, 插图为 PbS 量子点的直径大小分布直方图; (c) PbS 光电探测器的 SEM 图; (d) PbS 光电探测器的 SEM-EDS 图

Fig. 2 Performance test results of photodetector. (a) XRD data of PbS quantum dots; (b) TEM of PbS quantum dots, the illustration is a histogram showing the distribution of diameter sizes of PbS quantum dots, (c) SEM of PbS photodetectors, (d) SEM-EDS of PbS photodetector

响应度 (R) 和探测率 (D^*) 作为评估光电探测器的性能的重要参数, 能直接反应光电探测器的好坏。响应度 (R) 和探测率 (D^*)^[24] 的计算公式如下:

$$R = \frac{I_{\text{ph}}}{P_{\text{in}}} = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{P * A}, \quad (1)$$

$$D^* = R \sqrt{\frac{A}{2eI_{\text{dark}}}}, \quad (2)$$

式中, I_{ph} 为光电流与暗电流的差值, P_{in} 是入射光功率密度, 式 (2) 中 A 是器件的有效照射面积, e 为元电荷, 值为 1.6×10^{-19} 库伦。通过上述两式可计算出 PbS 量子点光电探测器在 532 nm 光照

下,不同光功率密度下的响应度和探测率,将二者绘制成图 3(d)(彩图见期刊电子版)。从图中可以看出,在光功率密度为 $15.2 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的情况下, R 和 D^* 在 -3 V 偏压下分别达到了 0.3275 A/W 和 $1.3332 \times 10^{12} \text{ Jones}$ 。

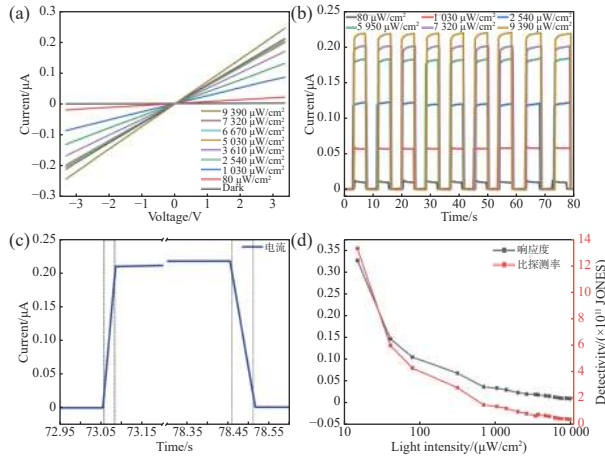


图 3 (a) PbS 量子点光电探测器在不同光功率密度下的电流-电压(I-V)图; (b) -3 V 偏压下 PbS 量子点光电探测器在不同光功率密度下的电流-时间(I-T)图; (c) PbS 量子点光电探测器在 $9390 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 光强下的响应时间图; (d) PbS 光电探测器件在不同光功率密度下的响应度曲线图和比探测率曲线图

Fig. 3 (a) Current-voltage (I-V) diagram of PbS quantum dot photodetector at different optical power densities; (b) current-time (I-T) diagram of PbS quantum dot photodetector at different optical power densities when bias is -3 V ; (c) response time of PbS quantum dot photodetector at $9390 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ light intensity, (d) responsivity curve and specific detection rate curve of PbS photodetector at different optical power densities

3.2 器件在脉搏检测系统中的测试结果及分析

基于 PbS 量子点光电探测器的可视化脉搏检测系统如图 4(a) 所示。其中,从左至右依次为前端电路模块、电子显示屏、STM32 单片机和比较器。图 4(b) 为实测时电子显示屏显示图,上半部分为所测脉搏波形。下半部分为经过比较器和处理器处理计算后得出的每分钟脉搏数值。本系统所用光源的发光强度为 700 mcd (毫坎德拉),光电探测器施加的偏压为 3.3 V 。

用图 4(a) 所示检测系统检测同一测试者不同运动状态时的脉搏,检测结果如图 5(彩图见期刊电子版)所示。可见,处于平静状态时,测试者的脉搏波形较为平坦且单次脉搏跳动周期比较长,

每次脉搏峰值较低,而测试者剧烈运动后的脉搏幅值变化则十分明显,单次脉搏跳动周期比较紧凑,每次脉搏峰值较高。由上述结果可以得出,当测试者处于不同运动状态时,可视化脉搏检测系统可以明显地检测出测试者所处运动状态下脉搏的幅值变化及跳动快慢,并且能够实时在图像上显示出来。

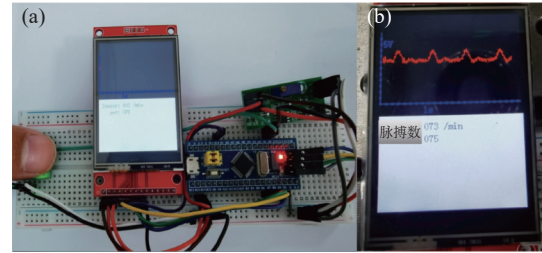


图 4 (a) 基于 PbS 量子点光电探测器的可视化脉搏检测系统实物图; (b) 系统实测时电子显示屏显示图

Fig. 4 (a) The physical image of the visual pulse detection system based on the PbS quantum dot photodetector; (b) the display diagram of the electronic display screen during the actual measurement of the system

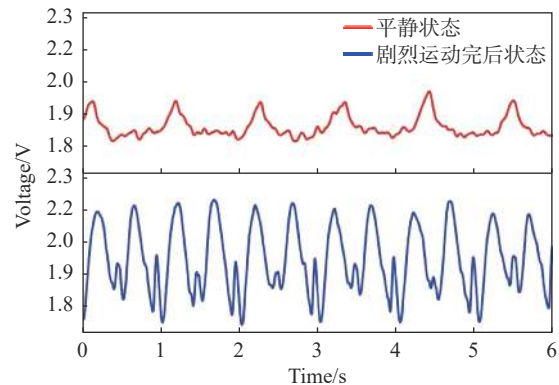


图 5 同一测试者不同运动状态时的脉搏变化图

Fig. 5 Pulse changes of the same test subject at different motor states

对不同测试者同一运动状态的脉搏进行检测,检测结果如图 6(a) 所示。可见,3 位测试者在平静状态下的单次脉搏周期都比较长,3 位测试者的脉搏幅值都各不相同,单次脉搏所用的时间及不同测试者脉搏跳动幅度大小也各不相同。通过上述结果发现可视化脉搏检测系统可以显示出不同测试者的脉搏波形。测试结果表明可视化脉搏检测系统的灵敏度满足脉搏检测要求。相隔 5 周,用所研制的系统再次对同一测试者进行脉搏检测,检测结果如图 6(b) 所示。系统测得每分钟脉搏数有 2-3 次误差,考虑到不同时间测试者

的身体状态不同, 所以检测结果仍能客观反映测试者脉搏是否正常, 表明本系统的稳定性较好, 满足脉搏检测要求。

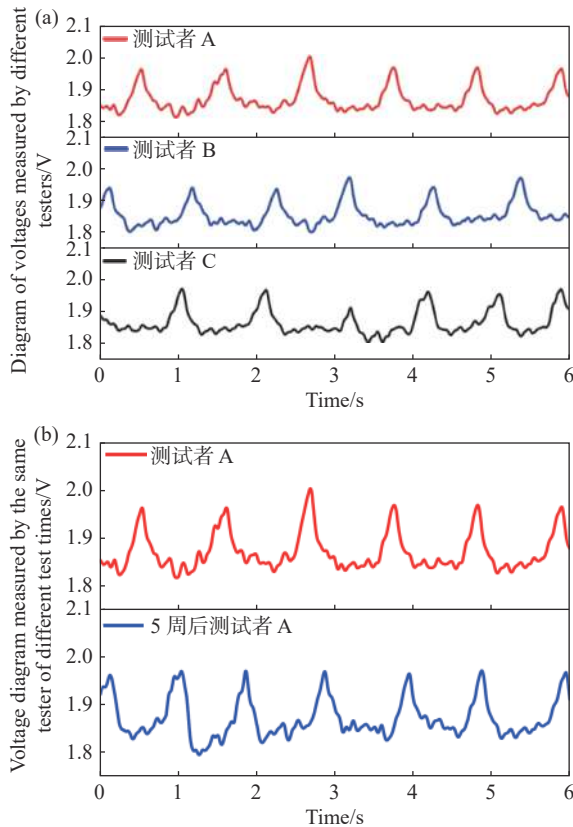


图 6 (a) 不同测试者同一运动状态的脉搏变化图; (b) 同一测试者不同测试时间的脉搏变化图

Fig. 6 (a) Pulse change plot of different testers at the same exercise state; (b) pulse change plot of the same tester at different test times

作为对比实验, 使用 gladstone YK-83B2 指夹式脉搏血氧仪对测试者左手拇指同时进行多次检测, 图 7 为同一测试者在自研系统和 gladstone YK-83B2 指夹式脉搏血氧仪下的电压示意图。表 1 为两个测试系统脉搏测试结果统计表。

由图 7 和表 1 可知, 本系统测得的脉搏电压幅值变化虽然比 gladstone 系统低, 但其幅值变化已经足以让系统处理器识别和进行模数转换。通过多次测量得知脉搏测得的结果有 1-5 次的误差。这是由于两个测试系统中的传感器所测量的手指指端位置并不完全相同, 导致在极少数脉搏跳动幅度较小时, 系统没有识别该次脉搏而造成误差, 虽然此类误差的存在导致两个测试系统的测试结果略有区别, 但将多次测得的脉搏数与人体正常脉搏范围进行比较发现本系统测得的脉

搏数一直处在人体正常脉搏范围内, 由此说明本系统检测结果仍能客观反映测试者的脉搏测量结果。

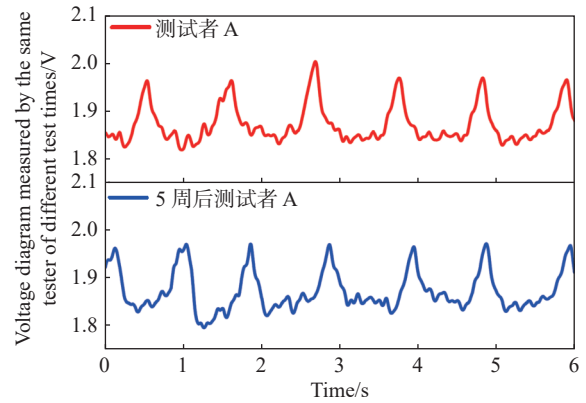


图 7 同一测试者不同检测系统的电压示意图

Fig. 7 Voltage diagram of the same tester tested by different test systems

表 1 两种系统脉搏检测结果统计表

Tab. 1 Statistical table of pulse test results of the two systems (Unit: times/minute)

名称	第一次测试	第二次测试	第三次测试
PbS量子点光电探测器	63	73	68
gladstone	64	70	73

4 结 论

本文基于 PbS 量子点光电探测器件研制了数据可视化的脉搏检测系统。利用热注射法将合成得到的 PbS 量子点旋涂在金叉指电极表面, 构筑成 PbS 量子点光电探测器, 并将其运用在可视化脉搏检测系统中。运用光电容积脉搏波描记法, 对不同测试者同一运动状态以及对同一测试者不同运动状态下的脉搏进行检测, 分析系统的可靠性和灵敏度。在 5 周后利用该系统对同一测试者再次进行脉搏测量, 分析系统稳定性。器件测试结果显示, PbS 量子点光电探测器在 532 nm 激光照射下的响应度 (R) 和探测率 (D^*) 分别为 0.33 A/W 和 1.33×10^{12} Jones。将其用于测量脉搏电路中, 结果显示该系统能够有效接收并测得人体脉搏信号, 表明基于 PbS 量子点光电探测器的可视化脉搏检测系统在灵敏度、稳定性以及可靠性均满足脉搏检测要求, 为量子点的应用拓宽了方向。

参考文献:

- [1] ARNOLD C G, WALKER J R, METTER E J, *et al.*. Pulse oximeter plethysmograph waveform and automated oscillometric sphygmomanometer for ankle-brachial index measurement[J]. *The American Journal of Emergency Medicine*, 2021, 40: 162-165.
- [2] FINE J, BRANAN K L, RODRIGUEZ A J, *et al.*. Sources of inaccuracy in photoplethysmography for continuous cardiovascular monitoring[J]. *Biosensors*, 2021, 11(4): 126.
- [3] CHOI S H, KIM S Y, PARK S H, *et al.*. Diagnostic performance of CT, gadoxetate disodium-enhanced MRI, and PET/CT for the diagnosis of colorectal liver metastasis: Systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2018, 47(5): 1237-1250.
- [4] JUNG H, KIM D, LEE W, *et al.*. Performance evaluation of a wrist-worn reflectance pulse oximeter during sleep[J]. *Sleep Health*, 2022, 8(5): 420-428.
- [5] WANG J, ZHU Y R, WU Z Y, *et al.*. Wearable multichannel pulse condition monitoring system based on flexible pressure sensor arrays[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2022, 8(1): 16.
- [6] 陈星池, 赵海, 李晗, 等. 近红外可穿戴设备中脉搏波的呼吸率检测[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1297-1306.
CHEN X C, ZHAO H, LI H, *et al.*. Detection of respiratory rate using pulse wave on near infrared wearable devices[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1297-1306. (in Chinese).
- [7] 张丽娜, 周润景, 武佩, 等. 基于心电、脉搏波信号的动脉硬化无创检测[J]. *生物医学工程学杂志*, 2016, 33(4): 631-638,644.
ZHANG L N, ZHOU R J, WU P, *et al.*. Study on non-invasive detection of atherosclerosis based on electrocardiogram and pulse wave signals[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2016, 33(4): 631-638,644. (in Chinese).
- [8] MOÇO A, VERKRUYSSSE W. Pulse oximetry based on photoplethysmography imaging with red and green light: Calibratability and challenges[J]. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 2021, 35(1): 123-133.
- [9] CHARLTON P H, PILT K, KYRIACOU P A. Establishing best practices in photoplethysmography signal acquisition and processing[J]. *Physiological Measurement*, 2022, 43(5): 050301.
- [10] MOÇO A V, STUIJK S, DE HAAN G. New insights into the origin of remote PPG signals in visible light and infrared[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 8501.
- [11] 吴育东, 钟舜聪, 伏喜斌. 基于光电容积脉搏波的血压测量实验研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(8): 865-869.
WU Y D, ZHONG S C, FU X B. Blood pressure measurement based on photoelectric volume pulse wave[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(8): 865-869. (in Chinese).
- [12] MAEDA Y, SEKINE M, TAMURA T, *et al.*. Comparison of reflected green light and infrared photoplethysmography [C]. *2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, IEEE, 2008: 2270-2272.
- [13] HUANG Y T, LIANG H F, ZHANG Y L, *et al.*. Vertical tip-to-tip interconnection p-n silicon nanowires for plasmonic hot electron-enhanced broadband photodetectors[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, 4(2): 1567-1575.
- [14] 朱晓秀, 葛咏, 李建军, 等. 量子点增强硅基探测成像器件的研究进展[J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 62-74.
ZHU X X, GE Y, LI J J, *et al.*. Research progress of quantum dot enhanced silicon-based photodetectors[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 62-74. (in Chinese).
- [15] HOU B, KIM B S, LEE H K H, *et al.*. Multiphoton absorption stimulated metal chalcogenide quantum dot solar cells under ambient and concentrated irradiance[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(39): 2004563.
- [16] HU A Q, TIAN H J, LIU Q L, *et al.*. Graphene on self-assembled indium quantum dots enabling ultrahighly sensitive photodetectors[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(8): 1801792.
- [17] TANG J F, SIE Y D, TSENG Z L, *et al.*. Perovskite quantum dot-ZnO nanowire composites for ultraviolet-visible photodetectors[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(5): 7237-7245.
- [18] TETSUKA H, NAGOYA A, TAMURA S I. Graphene/nitrogen-functionalized graphene quantum dot hybrid broadband photodetectors with a buffer layer of boron nitride nanosheets[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(47): 19677-19683.
- [19] DONG R, BI C, DONG Q F, *et al.*. An ultraviolet-to-NIR broad spectral nanocomposite photodetector with gain[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(6): 549-554.
- [20] 许峻峰. 硫化铅量子点薄膜光电器件的性能提升[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.

- XU J F. *Performance enhancement of PbS quantum dots based thin-film optoelectronic devices*[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. (in Chinese).
- [21] LUO M T, CHEN R, ZHU Z W, *et al.*. A broadband photodetector based on PbS quantum dots and graphene with high responsivity and detectivity[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(13): 1996.
- [22] CHEN H, CHEN J. High performance near-infrared photodetector based on PbS quantum dots and graphene[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 339: 113508.
- [23] SONI A K, JOSHI R, NINGTHOUJAM R S. *Hot Injection Method for Nanoparticle Synthesis: Basic Concepts, Examples And Applications*[M]//TYAGI A K, NINGTHOUJAM R S. *Handbook on Synthesis Strategies for Advanced Materials*. Singapore: Springer, 2021: 383–434.
- [24] WU C Y, ZHU H N, WANG M, *et al.*. Controlled synthesis of GaSe microbelts for high-gain photodetectors induced by the electron trapping effect[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(16): 5375-5379.

作者简介:



朱建平(1977—),女,上海人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事无线传感器、检测技术研究工作。E-mail: jp-zhu@shou.edu.cn