

## 级联光栅硅胶封装的脉象传感器研究

陆 锋<sup>1</sup>, 陈 亮<sup>2\*</sup>, 张俊生<sup>3,4</sup>

- (1. 太原工业学院 电子工程系, 山西 太原 030008;
2. 电子科技大学 机械与电气工程学院, 四川 成都 611731;
3. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;
4. 信息探测与处理山西省重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 提出了一种基于级联光栅的脉象波传感器。相同参数的两个光纤光栅组成级联光栅并植入硅胶腕带中, 其中一个光栅作为传感光栅被用于感知脉搏信号, 另一个光栅作为匹配光栅被用于解调。由于两个光栅参数完全相同, 其反射峰重叠, 传感器反射光谱表现为单个反射峰。脉搏搏动产生的应变变化对传感光栅进行调制, 导致传感光栅反射峰的中心波长产生偏移, 进而导致传感器反射光的强度变化。通过对反射光的强度进行监测, 即实现了脉象信息的测量和提取。实验中分别测试了健康男性青年和老年受试者, 以及同一个健康男性受试者上午 8 时和下午 8 时的脉象信息。结果显示, 传感器可有效提取不同受试者的脉象特征点, 测试结果符合中医脉象理论。当环境温度变化时, 级联光栅中两个光栅的反射峰以相同速率向同一方向偏移, 传感器反射光谱的强度不变, 因此该传感器不受环境温度影响。此外, 该传感器具有结构简单、解调方便、成本较低等优点, 在脉象测试中具有一定的应用潜力。

**关键词:** 级联光栅; 传感器; 脉象; 应变

**中图分类号:** TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220324

## Pulse sensor based on cascade grating using silica gel package

Lu Feng<sup>1</sup>, Chen Liang<sup>2\*</sup>, Zhang Junsheng<sup>3,4</sup>

- (1. Department of Electronic Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
3. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
4. Shanxi Key Laboratory of Signal Capturing & Processing, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** A pulse sensor based on cascaded grating is proposed. Cascaded gratings composed of two fiber Bragg gratings with the same parameters are implanted into the silicone wristband. One fiber Bragg grating is used as a sensing grating to sense the pulse signal, and the other grating is used as a matching grating for demodulation. Because the parameters of the two gratings are exactly the same, their reflection peaks overlap, and the reflection spectrum of the sensor shows a single reflection peak. The pulse signal modulates the strain state of the sensing grating under the action of stress, resulting in the shift of the central wavelength of the reflection peak

收稿日期: 2022-05-10; 修订日期: 2022-06-05

基金项目: 山西省重点研发计划 (201803D121069); 教育部产学研合作协同育人项目 (202102443002);  
山西省高等学校科技创新项目 (2019L0932, 2020L0624)

作者简介: 陆锋, 男, 副教授, 硕士, 主要从事光信息处理、光纤通信方面的研究。

通讯作者: 陈亮, 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事智能传感器及信号处理方面的研究。

of the sensing grating, which leads to the change of the reflected light intensity of the sensor. By monitoring the reflected light intensity of the sensor, the measurement and extraction of pulse are realized. In the experiment, the pulse of healthy young and old male subjects, and the same healthy male subjects at 8 am/pm are tested. The results show that the sensor can effectively extract the pulse feature points of different subjects, and the test results are in line with the pulse theory of traditional Chinese medicine. When the ambient temperature changes, the reflection peaks of the two gratings shift in the same direction at the same rate, and the reflected light intensity of the sensor remains stable, so the sensor is not affected by the ambient temperature. In addition, the sensor has the advantages of simple structure, convenient demodulation and low cost. There are potential applications in pulse measurement.

**Key words:** cascaded grating; sensor; pulse; strain

## 0 引言

脉诊是通过医生的手指触摸患者动脉搏动情况,推测患者病情的诊断方法。脉象在一定程度上能够反映人体的各种生理和病理情况,对于识别病症、判断病情和分辨病机等方面具有重要意义<sup>[1]</sup>。然而,脉象非常依赖于医生的行医经验和水平,临床上通过对医生指下感觉结合相应的脉象概念来进行判别。由于脉象概念本身比较笼统,具体的判别标准又很模糊,因此脉象准确性常受医生的判别经验及指下感觉等诸多主观因素的影响。此外,医生的工作状态和工作环境等客观因素也给脉诊质量带来明显影响。这种主观性和客观性因素相交织,严重制约了脉诊的交流、应用和发展<sup>[2]</sup>。因此,必须将脉诊与现代科学相结合,提高脉诊精度和可靠性。

脉诊仪是中医脉诊的客观化方式之一,通过结合中医理论、机械电子技术、生物医学等多门学科,可以较为客观地再现脉搏搏动<sup>[3]</sup>。脉象传感器是脉诊仪的重要组成部分,其性能直接影响脉诊仪后续数据处理部分和最终的脉象准确性,因此,对脉象传感器性能提升方面的研究至关重要。当前,国内外提出了多种电子脉象传感器,根据不同工作原理,可以分为压力型<sup>[4-5]</sup>、光电型<sup>[6]</sup>、传声器型<sup>[7]</sup>、超声多普勒型<sup>[8]</sup>等。然而,由于脉搏搏动较为微弱,且需要测定脉象信息所在不同脉搏层的静压力,要求传感器具有较高的静态及动态压力灵敏度。此外,脉搏信息中的速度波信息对传感器的灵敏度和频带宽度提出了较高要求<sup>[9]</sup>。

光纤传感器具有质轻径细、不受电磁干扰等优

点,近年来被应用于脉象在内的多种物理参量的测量<sup>[10]</sup>。作为最典型的一种光纤传感器,光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)具有灵敏度高、动态范围大的优点,在宽频带、微弱信号测试方面具有显著优势,尤其适合于脉象信息的精确测量<sup>[11]</sup>。目前已经出现了多种基于 FBG 的脉象传感器,包括触点式结构<sup>[12]</sup>、织物封装<sup>[13]</sup>、柔性基体植入<sup>[14]</sup>等。这些传感器能有效获取及识别脉象信号,为脉诊客观化提供了可靠的技术途径。然而,这些传感器依赖于高频率的波长解调,因此需要复杂、昂贵的解调系统,限制了其实际应用和推广。针对这一问题,有学者提出了基于微结构光纤干涉仪的 FBG 脉象解调方法,通过对光纤加工形成法布里-珀罗腔<sup>[15]</sup>或马赫-曾德尔干涉仪<sup>[16]</sup>,将其作为边沿滤波器应用到 FBG 波长解调系统中。这种方法显著降低了解调系统成本,然而面临的挑战是加工形成的微结构干涉仪机械强度和稳定性较差。

文中提出了一种基于级联光栅硅胶封装的脉象传感器。将相同参数的级联 FBG 封装于硅胶腕带中,通过测量匹配光栅的反射光强度,实现了脉象信息的高频动态解调和获取。

## 1 传感器原理与结构设计

### 1.1 传感机理

FBG 为折射率沿光纤纤芯的周期性调制。FBG 反射宽带入射光的窄带部分并透射其余大部分。根据耦合模理论,FBG 反射峰的中心波长 $\lambda_B$ 可以用布拉格条件表示为 $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ <sup>[17]</sup>。其中 $n_{eff}$ 为光纤单芯模的有效折射率, $\Lambda$ 为光栅的周期性。在环境温度恒定的条件下,由应变引起的布拉格波长偏移可以表示为:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda = 2n_{eff}(\varepsilon, T)\Lambda(\varepsilon, T) \quad (1)$$

对公式 (1) 进行全微分运算得到:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left( \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \right) \Delta\varepsilon \quad (2)$$

公式 (2) 是 FBG 应变传感的基本模型, FBG 的波长偏移为<sup>[18]</sup>:

$$\frac{\partial n_{eff}}{n_{eff}} = -\frac{n_{eff}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] |\varepsilon_{zz}| \quad (3)$$

$$P_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \quad (4)$$

式中:  $P_e$  为光纤的应变光学系数;  $P_{11}$  和  $P_{12}$  为应变光学张量的两个分量;  $\nu$  为泊松比。结合公式 (3)、(4), 可将 FBG 的波长偏移表示为:

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\lambda_B\varepsilon \quad (5)$$

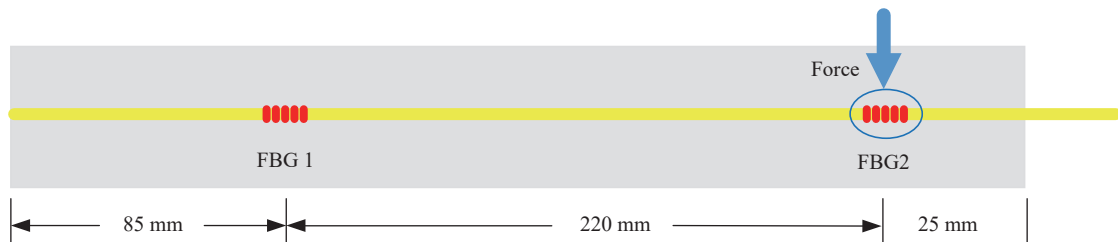
对于标准单模石英光纤,  $n_{eff}=1.456$ ,  $\nu=0.17$ ,  $P_{11}=0.121$ ,  $P_{12}=0.270$ ,  $P_e=0.216$ , 因此, 应变引起的 FBG 的波长偏移可由公式 (6) 给出:

$$\Delta\lambda_B = 0.784\lambda_B\varepsilon \quad (6)$$

由公式 (6) 可知, 对于确定材料的光纤光栅, 与材料相关的应变敏感系数为常数, 因此应变导致 FBG 波长线性偏移。

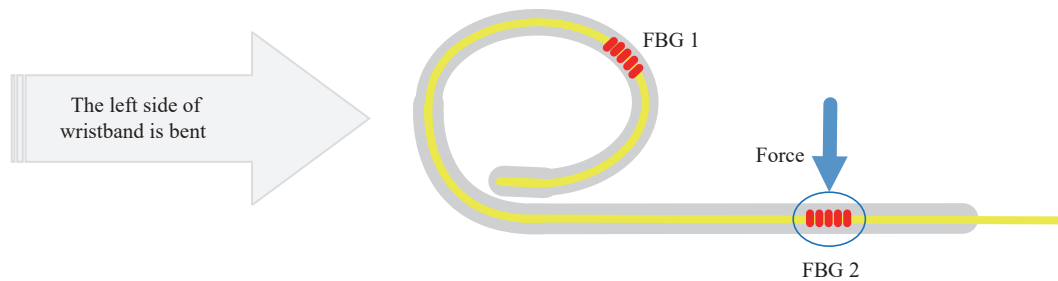
### 1.2 传感器设计

所提出的脉象传感器结构示意图的俯视图如图 1(a) 所示, 光栅 FBG 1 和 FBG 2 组成级联光栅, 并封装于硅胶腕带中。硅胶腕带宽 16 mm, 长 330 mm, 其中 FBG 1 距离硅胶腕带左端 85 mm, FBG 2 距离硅胶腕带右端 25 mm, FBG 1 和 FBG 2 间隔 220 mm。基于 FBG 在柔性基体中的应变传递效果研究<sup>[14]</sup>, 选择硅胶腕带厚度为 4 mm, 光纤封装在距离硅胶腕带下表面 1 mm 处。脉象测试时, 腕带左侧被弯曲而缠绕于腕关节, 此时传感器前视图如图 1(b) 所示。测试过程中, FBG 1 处于腕关节桡动脉处, 用于感知脉搏信号。腕带右侧呈自然状态水平放置, FBG 2 处有一“C 型夹”, 用于对 FBG 2 施加应变。



(a) 示意图的俯视图

(a) Top view of the schematic diagram



(b) 示意图的前视图

(b) Front view of the schematic diagram

图 1 传感器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sensor structure

结合图 2 中的传感器反射光谱示意图对脉象测量原理进行介绍。FBG 1 中心波长为  $\lambda_1$ , FBG 2 中心波长为  $\lambda_2$ 。FBG 1 和 FBG 2 参数相同,  $\lambda_1=\lambda_2$ , 两个光栅的反射峰重叠, 传感器光谱表现为单一反射峰, 如

图 2(a) 所示。当脉搏信号作用于 FBG 1 时, 在应变作用下其反射峰偏移, 此时中心波长为  $\lambda_1'$ , FBG 1 反射峰和 FBG 2 反射峰分离, 传感器反射光谱如图 2(b) 所示。因此, 对传感器反射光的强度进行监测即可得到

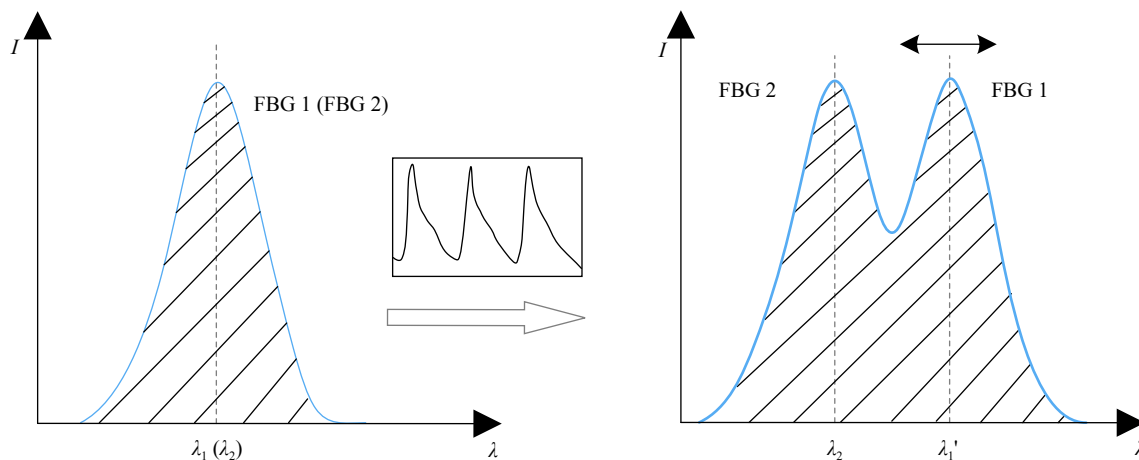


图 2 传感器反射光谱示意图

Fig.2 Schematic diagram of reflection spectrum of the sensor

FBG 1 反射峰的波长偏移量,进而获取脉象信息。

脉搏测试中需要注意,当腕带被弯曲缠绕于腕关节时,FBG 1 所承受的应变增加,其反射峰偏移。因此,在腕带缠绕于腕关节后,应通过“C 型夹”对 FBG 2 施加应变,使得 FBG 2 反射峰以同 FBG 1 相同的方向偏移,进而使 FBG 1 反射峰和 FBG 2 反射峰重合。需要说明的是,由于 FBG 1 和 FBG 2 参数相同,当环境温度变化时,FBG 1 反射峰和 FBG 2 反射峰以相同速率向同一方向偏移,二者相对位置不变,此时传感器反射光的强度恒定,因此该传感器在脉象测试时不受环境温度变化的影响。

## 2 传感器制作

使用相位掩膜法在单模光纤 (Fibercore PS750) 上分别刻写两个相同参数的 FBG 1 和 FBG 2。光纤直径 125 μm, 栅区长度 8 mm, 光栅中心波长 1 550.25 nm, 反射峰带宽 0.2 nm。所使用激光器为 248 nm KrF 准分子激光器, 输出能量为 25 kV, 脉冲重复频率为 10 Hz, 曝光时间为 40 s。通过模具制作硅胶腕带, 并将刻写有光栅的光纤植入其中。所使用的模具分为两部分, 每部分的两侧都刻有半圆形凹槽, 凹槽直径为 150 μm (略大于光纤直径)。首先, 将光纤沿半圆形凹槽组装至模具中, 并用配套螺丝将两部分模具进行紧固。之后, 将液态聚二甲基硅氧烷和辅助固化剂按质量比 15 : 1 混合均匀倒入模具中, 将模具放入真空干燥箱中, 使混合物气泡浮到表面并破裂, 真空干燥

箱温度设置为 80 °C, 并静置 3 h。最后, 拆除模具后小心取出硅胶腕带, 并将硅胶腕带左侧的光纤进行切除即完成了传感器的制作, 如图 3 所示。

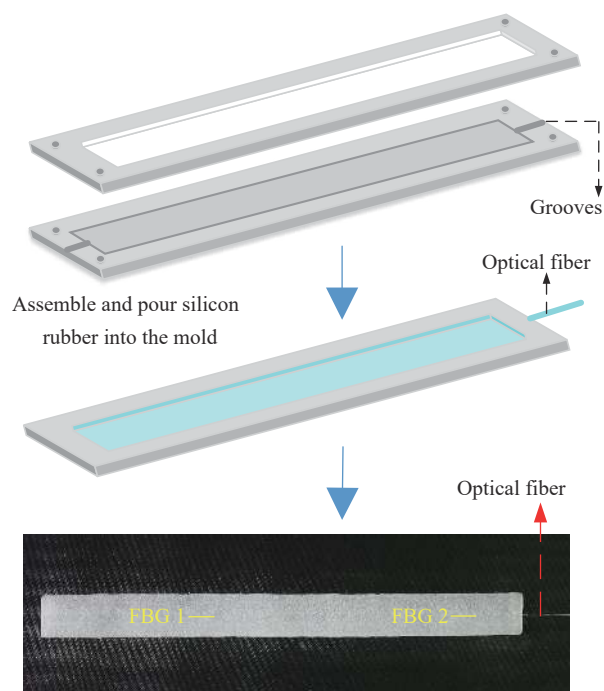


图 3 级联光栅硅胶植入示意图

Fig.3 Schematic diagram of the cascading grating implanted into silicone

## 3 实验

使用图 4 所示的系统对所提出的传感器进行实验研究。光源发出的光分别经过环形器端口 1 和端

口 2 输入传感器, 传感器中的光信号被脉搏搏动信息调制后沿原路返回, 分别经过端口 2 和端口 3 后输入

光电探测器。光电探测器将光信号的强度转换为电信号, 通过数据采集卡输入电脑。

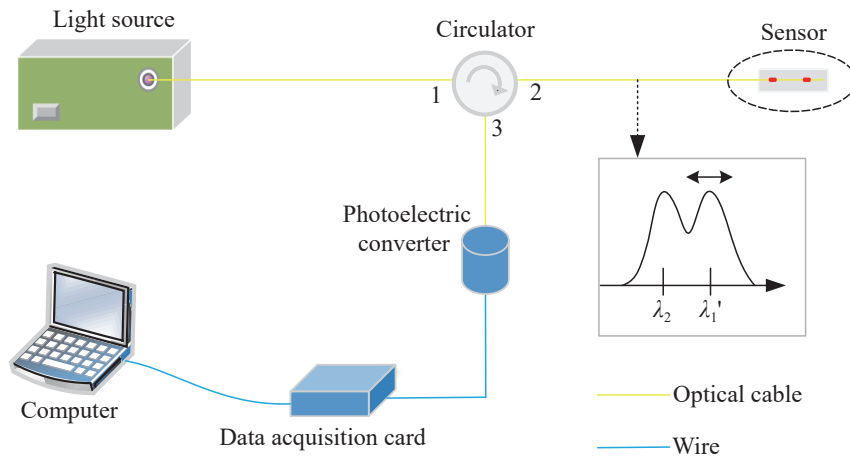


图 4 测试系统图

Fig.4 Diagram of the measurement system

被测部位为右手腕关节桡动脉, 实验照片如图 5 所示。受试者静息 5 min, 保持脉象稳定, 端坐平静, 自然呼吸, 右手手腕平放在脉象采集枕上, 保持手腕和心脏齐平。将硅胶腕带沿手腕贴紧缠绕, FBG 1 对准手腕桡动脉脉动最强处。通过顺时针旋转“C 型夹”旋钮, 从而对 FBG 2 施加应变, 同时观察传感器反射信号的强度。当 FBG 1 反射峰和 FBG 2 反射峰重叠时, 反射信号强度最低。因此, 观察并记录反射信号强度最低时刻的“C 型夹”旋钮位置, 在该位置开始采集脉象数据。

分别采集了 22 岁的健康男性青年受试者和 65 岁的健康男性老年受试者的脉象信息, 如图 6(a) 和图 6(b) 所示。由于 Chebyshev 滤波器具有阻带陡峭的特点, 可以高效、快速地分离信号中的不同频率成分, 因此图中波形均已通过 Chebyshev 低通滤波处理滤除高频噪声。可以看出, 青年受试者的脉象波形中的重搏波位置较高而重搏切迹位置较低。这是由于青年受试者心脏功能良好, 动脉血管弹性较好, 舒张期反射波强度明显, 传播速度缓慢。老年受试者的脉象波形轮廓与青年受试者明显不同, 重搏切迹位置上移, 导致重搏切迹和重搏波无法区分。这是由于随着年龄的增长, 心血管功能弱化, 动脉传导功能函数会发生变化。

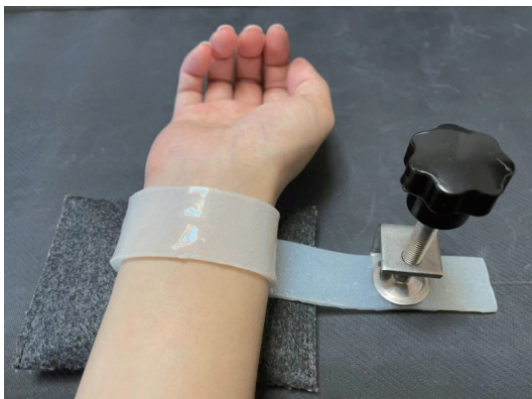
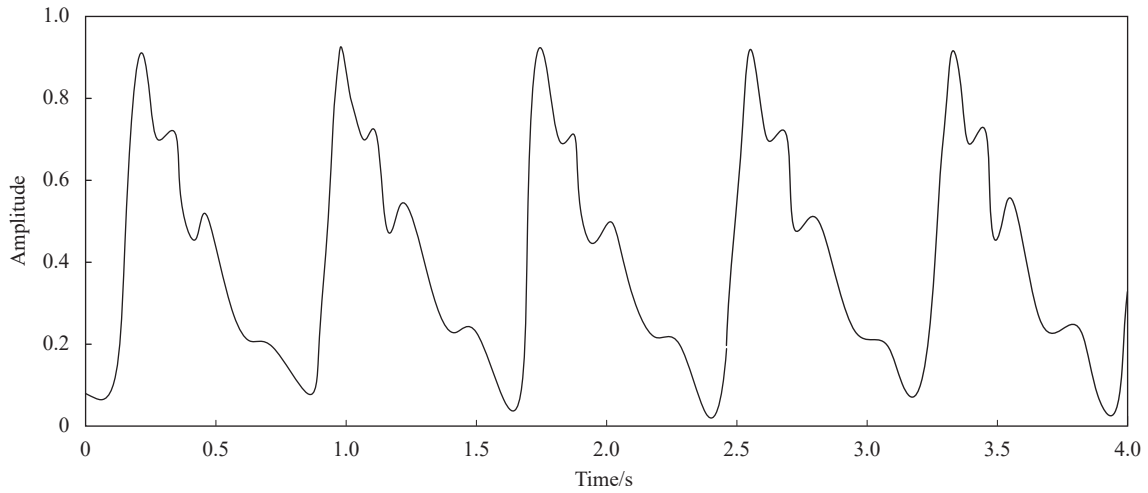


图 5 脉诊照片

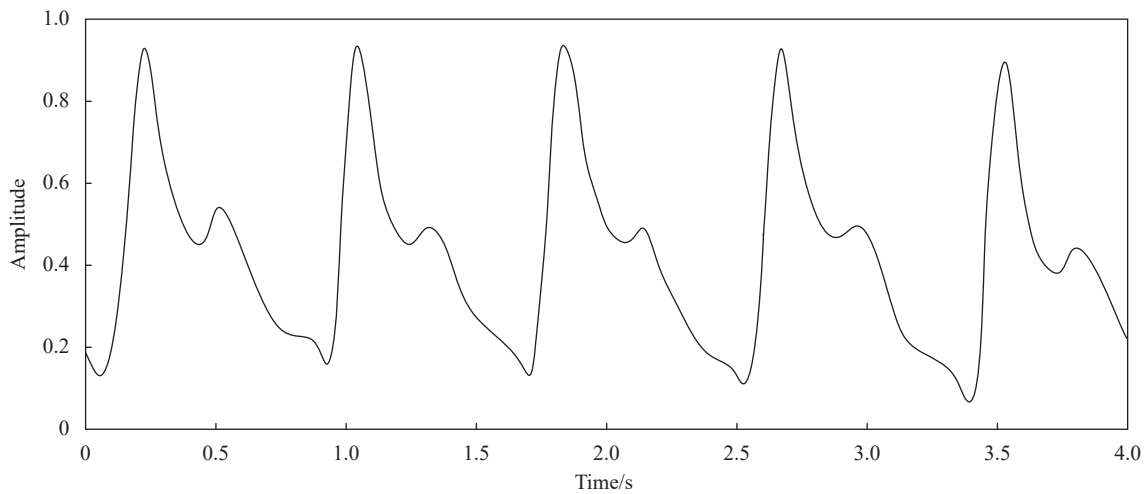
Fig.5 Photo of pulse diagnosis

对同一男性健康受试者在平静状态下分别采集了上午 8 时和下午 8 时的脉象信息, 如图 7(a) 和图 7(b) 所示。可以看出, 同一个健康受试者随着时间的变化, 脉象波形有规律地变化。上午 8 时的脉象波形具有强而尖锐的脉搏主峰, 三个波峰依次出现, 最能反映人体的生理信息。随着工作时间的延长, 下午 8 时的脉象波形中脉搏周期变长, 波峰幅值逐渐减弱, 这一现象符合中医脉象理论。



(a) 健康男性青年受试者

(a) Healthy male young subject

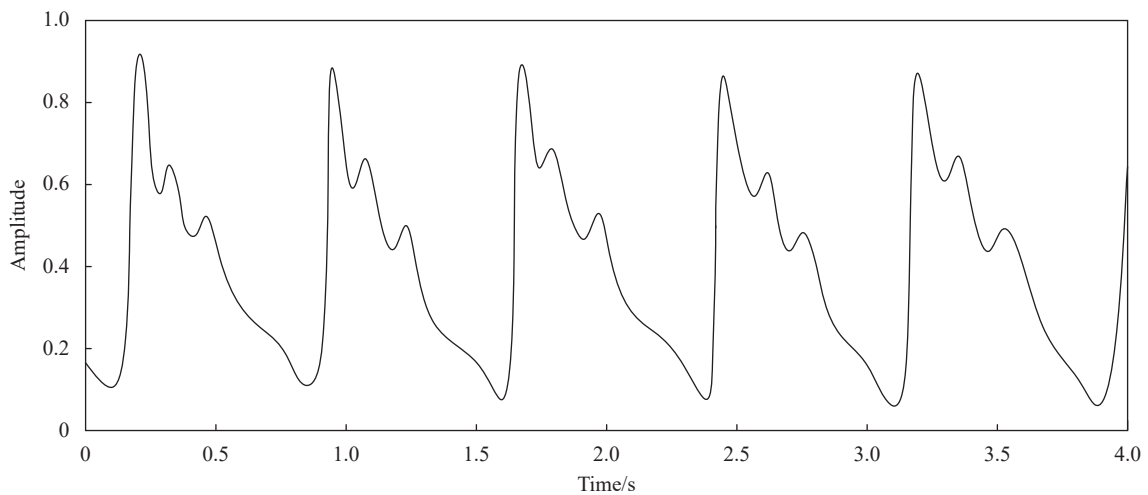


(b) 健康男性老年受试者

(b) Healthy male elderly subject

图 6 健康男性青年和老年受试者的脉象信息

Fig.6 Pulse waveforms of healthy male young and elderly subjects



(a) 8 am

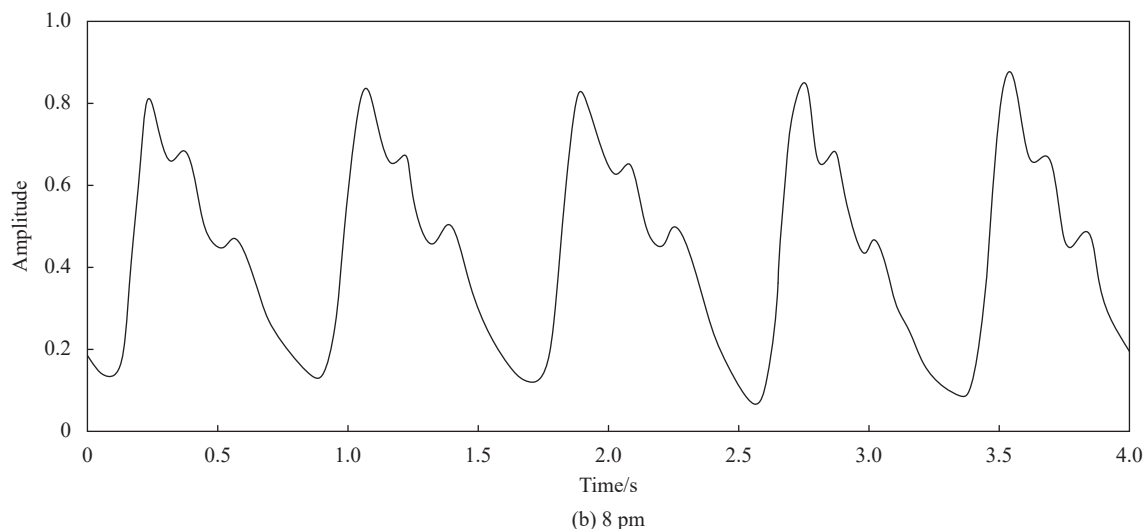


图 7 同一男性健康受试者上午 8 时和下午 8 时的脉象信息

Fig.7 Pulse waveforms of the same healthy male subjects at 8 am and 8 pm

## 4 结 论

通过将相同参数的两个光栅组成级联光栅植入硅胶腕带,利用脉搏跳动对级联光栅反射光谱进行调制,实现了基于强度解调的脉象测试和提取。将所提出的传感器应用于不同脉象信息监测,实验结果显示该传感器可有效获取受试者的脉象特征点,测试结果符合中医脉象理论。所提出的传感器具有不受环境温度影响、成本较低等优点。然而,由于采用强度解调,传感器对光源平坦度要求较高,后续将针对该方面情况深入研究,进一步提高测试精度。

### 参考文献:

[1] Li Yongming. Scientific basis of meridians: New interpretations of nine pulses in three parts [J]. *Chinese Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine*, 2021, 41(10): 1168-1173. (in Chinese)

[2] Pang Yudan, Liu Jianmin, Zhang Libin. The research progress of TCM pulse instrument [J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2014, 33(1): 101-107. (in Chinese)

[3] Ye Qing, Hu Jun, Liu Lijun, et al. Progress of electropulsograph research [J]. *China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy*, 2021, 36(5): 2834-2838.

[4] Zhou Huilin. Full-information force sensor for pulse condition diagnose [J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2021, 45(2): 141-144, 171.

[5] Bi Ruiyu, Zhao Yunlong, Zhu Xiaolong, et al. Research progress

on digitalization of pulse diagnosis of traditional Chinese medicine [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021, 34(4): 427-433. (in Chinese)

[6] Li Feng, Huang Zhaohong. Pulse analyzer based on photoelectrical sensor [J]. *Instrumentation Technology*, 2006(3): 75-77. (in Chinese)

[7] Zhou Peng, Gao Xiongfei, Zhang Yuman. The pulse detection system and method based on electret microphone [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(3): 374-380. (in Chinese)

[8] Liu Lei. Doppler ultrasound-based pulse signal analysis and classification research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

[9] Sang Suzhen. Study on the qualitative diagnosis, localization diagnosis and quantitative diagnosis of kings' pulse study [J]. *Guiding Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy*, 2015, 21(16): 13-15.

[10] Xiao Deng, Wan Shengpeng, Yin Xi, et al. Pulse acquisition system based on curved optical fiber sensor head [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0506003. (in Chinese)

[11] Luo Jingjing, Zuo Jingjing, Ji Zhongzhi, et al. Research review on pulse sensors for pulse diagnosis objectification [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 41(8): 1-14. (in Chinese)

[12] Li Shujuan, Zhang Faxiang, Ni Jiashen, et al. Point-contact type FBG dynamic pressure sensor and its application in the measurement of pulse information [J]. *Journal of*

- Optoelectronics · Laser*, 2016, 27(10): 1017-1022. (in Chinese)
- [13] Tian Xinyu. Research on fiber Bragg grating intelligent clothing for human pulse detection [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2016. (in Chinese)
- [14] Ge Ziyang, Wang Yan, Zhao Hui, et al. Characteristics of flexible fibre Bragg grating pulse wave sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(12): 1206002. (in Chinese)
- [15] Miao Changyun, Shen Ziqi, Zhang Cheng. Demodulation method of pulse-wave sensing by fiber Bragg grating based on Mach-Zehnder interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0205004. (in Chinese)
- [16] Wang Liqing, Miao Changyun, Zhang Cheng. Demodulation method of fiber Bragg grating pulse wave based on micro-structure Fabry-Perot interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1004002. (in Chinese)
- [17] Tang Chen, He Yanlin, Zhu Lianqing, et al. Research on end force measurement method of soft robot based on fiber Bragg grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200386. (in Chinese)
- [18] Liu Bingfeng, Dong Mingli, Sun Guangkai, et al. Strain transfer characteristics of fiber Bragg grating sensor in aerostat flexible composite skin deformation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200315. (in Chinese)