

# 基于光纤传感的睡姿与鼾声监测结构

疏轶超<sup>1</sup>, 麦淳铭<sup>1</sup>, 曾丽娜<sup>1,2,3\*</sup>, 李再金<sup>1,2,3</sup>, 陈浩<sup>1,2</sup>, 刘国军<sup>1,2,3</sup>, 李林<sup>1,2,3</sup>,  
乔忠良<sup>1,2,3</sup>, 曲轶<sup>1,2,3</sup>, 钟婷婷<sup>1</sup>, 杨隽锋<sup>1</sup>, 李联合<sup>3</sup>

<sup>1</sup>海南师范大学物理与电子工程学院, 海南 海口

<sup>2</sup>海南师范大学海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口

<sup>3</sup>海南师范大学半导体激光海南省国际联合研究中心, 海南 海口

收稿日期: 2023年6月9日; 录用日期: 2023年7月20日; 发布日期: 2023年7月28日

## 摘要

本文以光纤传感为基础设计了监测睡姿、鼾声的智能床结构, 获取人们在睡眠时身体的鼾声、睡姿等信息, 为睡眠健康监测提出新的研究思路与方法。采用级联式FBG传感器, 对人体的各处压力进行有效监测, 降低外界噪声对光纤传感准确性的影响。

## 关键词

睡眠健康, FBG传感器, 睡姿检测, 鼾声监测

# The Monitoring Structure of Sleeping Position and Snoring Based on Optical Fiber Sensor

Yichao Shu<sup>1</sup>, Chunming Mai<sup>1</sup>, Lina Zeng<sup>1,2,3\*</sup>, Zaijin Li<sup>1,2,3</sup>, Hao Chen<sup>1,2</sup>,  
Guojun Liu<sup>1,2,3</sup>, Lin Li<sup>1,2,3</sup>, Zhongliang Qiao<sup>1,2,3</sup>, Yi Qu<sup>1,2,3</sup>, Tingting Zhong<sup>1</sup>,  
Junfeng Yang<sup>1</sup>, Lianhe Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

<sup>2</sup>Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, Hainan Normal University, Haikou Hainan

<sup>3</sup>Hainan International Joint Research Center for Semiconductor Lasers, Hainan Normal University, Haikou Hainan

Received: Jun. 9<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 28<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 疏轶超, 麦淳铭, 曾丽娜, 李再金, 陈浩, 刘国军, 李林, 乔忠良, 曲轶, 钟婷婷, 杨隽锋, 李联合. 基于光纤传感的睡姿与鼾声监测结构[J]. 传感器技术与应用, 2023, 11(4): 382-388. DOI: 10.12677/jsta.2023.114044

## Abstract

An intelligent bed structure is designed based on optical fiber sensor to get information about the body's snoring and sleeping position during sleep in this paper. This study provides a new idea and method for sleep health monitoring. The cascaded FBG sensor is used to monitor the pressure of human body and reduce the influence of external noise on the accuracy of optical fiber sensing.

## Keywords

Sleep Health, FBG Sensor, Sleeping Posture Monitoring, Snore Monitoring

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着人口老龄化问题的日益严重, 针对老人等需要监护的群体进行实时的健康监测逐渐受到国内外研究人员的关注[1]。睡眠时这些群体的睡姿、心率和鼾声是反映人体睡眠健康的重要信号, 其心率和鼾声的长期监测对于预防某些疾病尤为重要。目前人们监测心率的方法有光电容积脉搏波描记(PPG) [2]和心电图(ECG) [3]。然而, 这两种方法都需要直接连接到人体, 并不适用于对呼吸和心率的长期监测, 也不适用于针对日常睡眠健康的监测。在这种情况下, 研究人员提出了电学感应方法, 如压电薄膜传感器[4]。这些方法又因容易受到电磁干扰而造成传感精度不佳等情况。

光纤传感器具有抗电磁干扰[5]、生物相容性和化学稳定性[6]的优点, 在睡眠健康监测方面有望取代电学传感器件。现阶段已有基于光纤传感的睡眠监测研究, Wang 等设计了一种基于马赫-曾德尔干涉仪的智能床垫, 该床垫可用于连续且无创地监测人体生命体征, 如心率、心跳幅度、呼吸频率和呼吸幅度[7]。Koyama 等使用嵌入衣服的异芯光纤传感器监测以及调整整个身体的护理动作, 所使用的传感器可以仅通过光学损耗变化来确定人体是否在重心上移动[8]。Xu 等使用一个激光二极管、一个光电探测器、一段双模光纤和几个标准的单模光纤制备了一个非侵入式光纤传感器并嵌入床垫, 经测试其生命体征监测性能与传统的监测仪具有一致性[9]。为了进一步推动睡眠质量监测的进展, 对光纤传感在睡眠健康方面进行深入研究, 探寻光纤传感在睡眠监测中的利用最大化十分有必要。

通过这些进展可知, 现在利用光纤传感监测睡眠的大部分是穿戴型的设备或是嵌入床垫的结构, 这些结构不仅影响人们的睡眠质量, 睡眠时的翻动也会影响设备的精确度。因此本文以光纤传感为基础设计了监测睡姿、鼾声的智能床结构, 为睡眠健康监测提出新的研究思路与方法。

## 2. 睡姿监测结构设计

### 2.1. FBG 结构原理

基于二氧化硅的 FBG 传感器因其重量轻、复用能力强以及对应变和温度的反应具有很高的灵敏度, 因而可以在睡眠监测领域得到广泛的应用。

光纤光栅是一种无源光子器件, 用于改变光纤传播的路径, 是一种光波导介质, 其物理结构呈现一

种周期性的分布。光纤光栅中最为普遍的一种是光纤布拉格光栅，其折射率的调制深度和光栅的周期都为常数，并且光栅波矢的方向和光纤的轴向是一致的，是一种性能非常好的窄带的反射滤波无源的光子器件。其结构图如图 1 所示。其工作原理为：当有光通过光纤光栅的时候，其中满足布拉格条件的光波就会被反射回来。

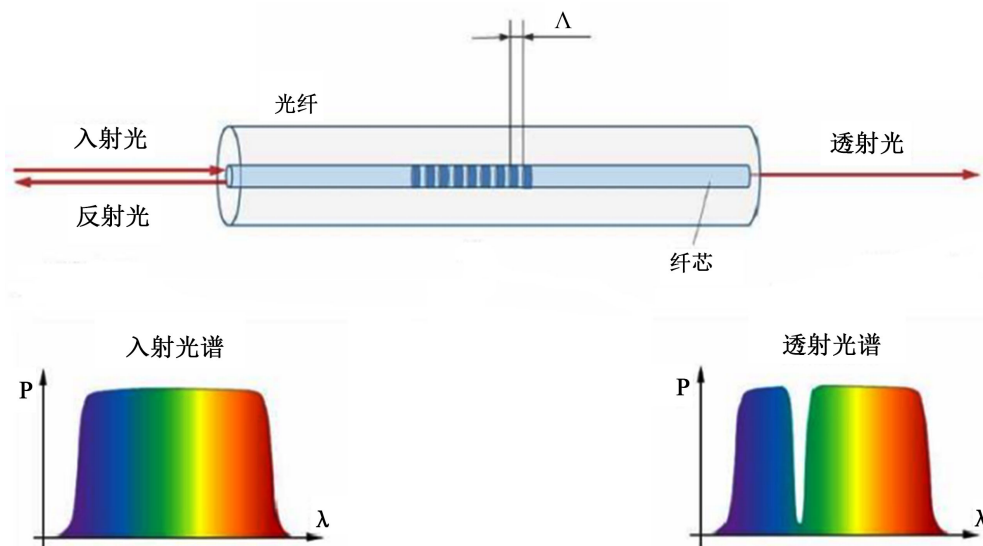


Figure 1. The Fiber Bragg grating  
图 1. 光纤布拉格光栅结构

## 2.2. 基本器件

睡姿监测的基本器件包括单模光纤、光纤布拉格光栅 FBG、光纤热缩管、床体、解调仪以及计算机构成。其中解调仪为光纤光栅测试仪(FBGA)。承载 FBG 的弹性卡片，材质为聚氯乙烯。

## 2.3. 传感器结构设计

光学传感器系统是基于光纤光栅的。FBG 是沿着光纤芯的周期性折射率变化；光栅周期的变化将导致反射波长的变化。因此，FBG 对影响光栅周期的外部施加的热负荷和机械负荷很敏感。对于传感器所经历的压力变化，应变通过光栅周期性的扩展或收缩来移动布拉格波长。所提出的系统使用一系列特殊封装的 FBG 传感器(12 个传感器沿着相同的光纤放置在 3 乘 4 矩阵阵列中)，放置在床体上。当一个人躺在床上时，施加在床垫上的压力会导致不同传感器的布拉格波长偏移。通过适当的校准，可以推断出每个传感器所经历的压力。

使用 FBG 传感器对睡眠者进行非侵入式监测的方法和系统。所设计的智能床结构，包括整个床体、若干个传感器，并且所有的传感单元为光纤布拉格光栅，光纤布拉格光栅级联组成的传感器阵列，传感器阵列分布安装在床面上，传感器阵列的另一端连接解调装置。单个传感设计的结构如图 2 所示。在图 2 中，单个 FBG 通过普通的单模光纤固定在弹性卡片上。卡片四角存在固定点位，这四个点位作用是将整个单结构传感设计装置固定在床面上。当弹性卡片受到人体压力时，卡片下凹，FBG 产生同样的形变。由于 FBG 的中心波长的偏移与受到的应力大小有线性关系，可利用此结构实现单点的应力传感。四个固定点位上有弹性卡片，FBG 固定在卡片下方。在人们睡眠时卡片受到压力时下凹。FBG 与卡片产生同样的形变，这样既方便测量，又能分散压力保护 FBG [10]。

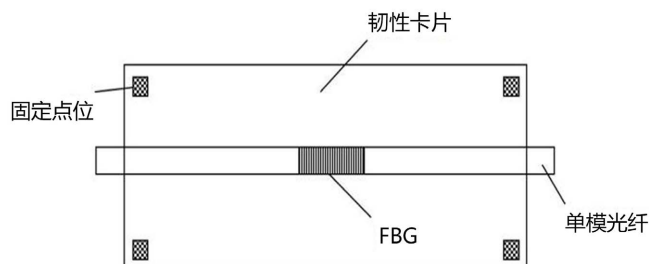


Figure 2. single sensor design structure

图 2. 单个传感设计结构

图 3 是多个级联的光纤光栅结构，可以分别对人体的受力点进行压力传感，获取人们在床上的压力分布。在图 3 中，图 2 中的单传感结构一共 12 个分布在床面上。可以实时监测人体各部位的压力情况。后端连接解调装置以及计算机。光纤热缩管用来保护连接各 FBG 的单模光纤。这种分布式分层拓扑结构可以监测各个传感点处是否受到了应力以及应力的大小，在受到应力后该传感点处对应的中心波长就会有相应的波长漂移。例如，图 3 中，中间四个单传感结构位于床的中轴，也就是人在睡眠时的中轴线。当中间位置的四个单传感器结构没有压力感应时，表明此刻人体在床的中间位置没有压力，人的睡姿大概率处于侧卧状态。如果不同位置的单传感结构间隔感受压力时，表明人在睡眠时的翻身，人们的睡眠质量不佳。

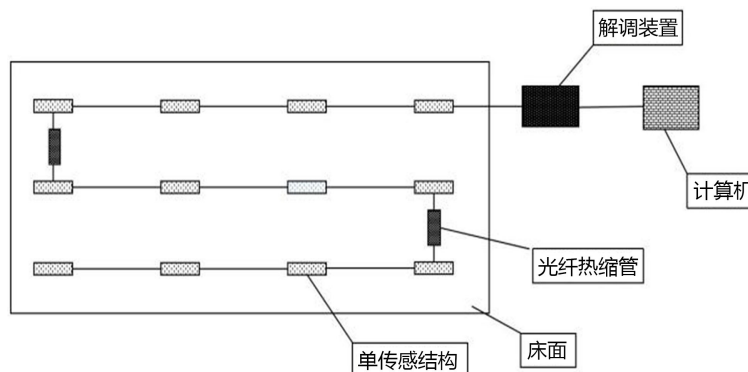


Figure 3. FBG cascade structure

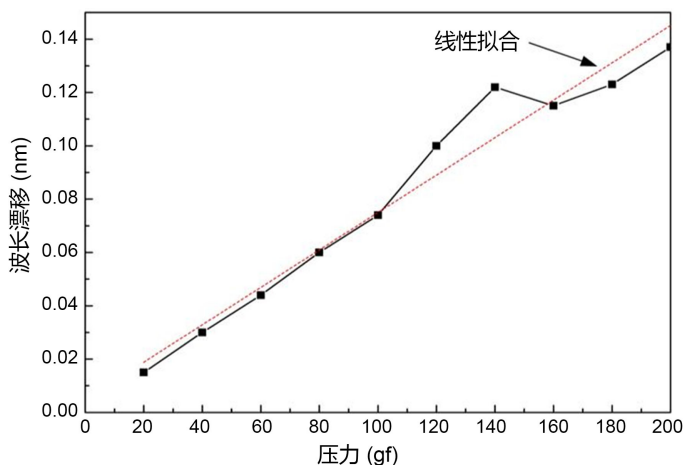
图 3. FBG 级联结构

在这种具有分布式分层拓扑结构的体系结构中，来自床上传感器阵列的连续观测流在相应的点位收集，来自各个点位的数据沿着相应的数据采集路径进一步组合，直到到达传感器选择和配置单元和分析仪单元，在配置单元与分析仪单元执行传感器管理与处理传感器观测数据相融合。

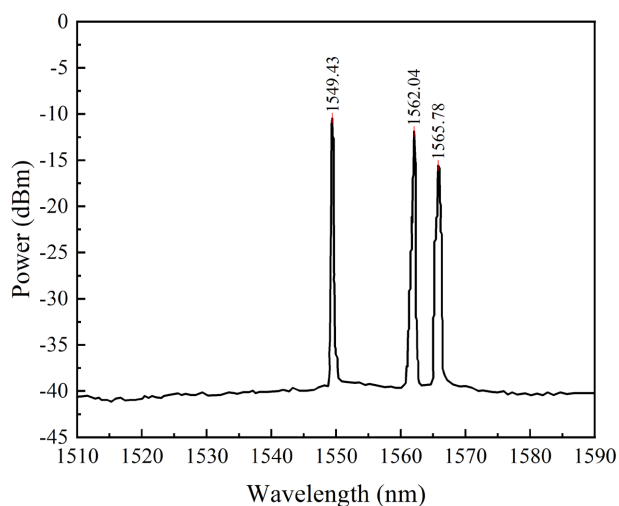
## 2.4. 传感器结构可行性分析

利用 Matlab 仿真 FBG 中心波长偏移量与所施加压力之间的曲线关系，如图 4 所示。当压力在 20~200 gf 之间逐步增加时，中心波长偏移量大致是逐步增加的，经仿真计算得知在微小压力作用于本设计涉及的传感器上时，其灵敏度约为 0.071 nm/N。

图 5 为 LabVIEW 处理 3 根 FBG 光谱系统的界面截图，3 根 FBG 的设定不同的中心波长为 1549 nm、1561 nm、1565 nm。通过 LabVIEW 可以在面板上实时显示出所设计传感器的光谱图，从图中可以看出，在 FBG 上施加一定的压力后，3 根 FBG 的中心波长分别变为了 1549.43 nm、1562.04 nm 和 1565.78 nm，相应的偏移量就是 0.43 nm、1.04 nm 和 0.78 nm，结果表明此结构设计是可行的。



**Figure 4.** Relation between center wavelength shift and pressure  
**图 4.** 中心波长偏移与压力关系



**Figure 5.** FBG spectrum simulation diagram  
**图 5.** FBG 光谱模拟图

### 3. 鼾声监测结构设计

#### 3.1. 鼾声监测原理

鼾声信号的检测方式包括两种，一种为接触式检测，另一种为非接触式检测。接触式检测主要是利用穿戴、粘贴、倚靠等方式使传感器紧贴于人体来采集鼾声信号。比如穿戴带有传感器的衣物，所采用的传感器一般为压电式传感器；而非接触式测量主要是利用声波传感器或者麦克风来采集鼾声信号，最大的优点是不需要直接接触人体，不会给受试者带来不适感。因而光纤声波传感器在鼾声监测方面具有很大的应用前景。

现有大部分光纤声波传感器采用光纤本身作为感应外界待检测参量变化的敏感元件，但是这类传感器会受到外界噪声对传感器本身的影响。因而传感器的封装技术可以有效降低这些影响。

#### 3.2. 结构设计

本设计采用半封闭式钢筒封装光纤的办法，开口面向床头的鼾声源，有效降低噪声影响，提高对异

常鼾声的分辨准确率。如图 6 所示。图 6 左为整个结构的外观图，图 6 右则是传感器收集声波端的侧面图。

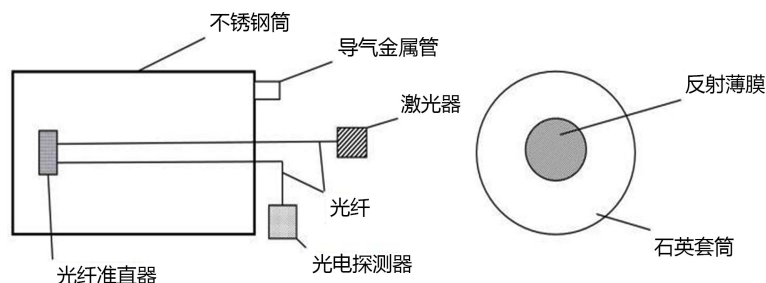


Figure 6. Snore monitoring sensor  
图 6. 鼾声监测传感器

预先调节使光纤准直器位于反射薄膜的偏心位置且二者保持相互垂直。准直器的两根单模光纤分别连接激光器和光电探测器，当没有鼾声信号时反射薄膜无形变。光束通过光纤经光纤准直器耦合成准直光束后射出，并到达无形变的反射薄膜后发生反射原路折返到光电探测器。因为反射薄膜没有发生形变，所以光信号没有损耗。

当存在鼾声时，反射薄膜形变，光经准直器到达反射薄膜后会产生部分光的反射，因而在返回到光电探测器上时光会产生损耗，通过所检测到的光强损耗大小可以反映出鼾声的情况。因为整个鼾声采集装置处于半封闭结构中，睡眠监测时可将装置置于床头鼾声源处，降低周围噪声对整个鼾声收集的影响。

除了考虑光纤声波传感器的灵敏度之外，传感器的频率响应也是非常重要的性能指标。依据本结构制备的光纤声波传感器属于膜片式结构，反射薄膜通过粘合剂固定在石英套筒的端面，其物理模型可以简化为一个边缘固定的圆形膜片。

### 3.3. 鼾声监测结构可行性分析

图 7 为本设计鼾声监测结构的理论分析模型，可选取直径为 2 mm，厚度为 20  $\mu\text{m}$  的镀金  $\text{SiO}_2$  薄膜作为传感器的反射薄膜，在薄膜表面施加大小为 500 Pa 的压力  $\Delta P$ ，得到反射薄膜中心位置的最大形变量  $\Delta X$ ，水平偏移量  $\Delta H$ 、垂直偏移量  $\Delta V$  和角度偏移量  $\alpha$  分别为 0.75  $\mu\text{m}$ ，0.06  $\mu\text{m}$ ，0.3  $\mu\text{m}$  和 0.02°。此时，由水平偏移量  $\Delta H$ ，垂直偏移量  $\Delta V$  和角度偏移量  $\alpha$  引起的光纤声波传感器产生的横向距离损耗、纵向偏移损耗和角度倾斜损耗的比值为  $1.45 \times 10^{-4}:3.85 \times 10^{-6}:1$ 。通过上述分析可以看出角度倾斜损耗占比最大，是导致传感器接收光强变化的决定性因素。因此，本设计制备的光纤声波传感器受到偏移角度的影响比距离更大。在实际制备中应做出对偏移角度与距离之间的权衡。

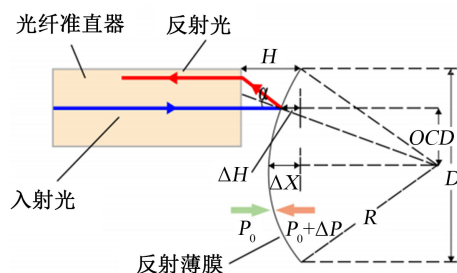


Figure 7. Theoretical analysis model of fiber optic acoustic sensor  
图 7. 光纤声波传感器的理论分析模型

## 4. 结论与展望

### 4.1. 结论

本文设计了以床为载体, 通过激光传感技术获取人们在睡眠时身体的鼾声和睡姿等信息实现睡眠监测。级联的光纤光栅传感器可以得到床体各位置的的压力情况, 得到人体的睡姿监测, 通过分析与仿真可知本传感器结构设计在理论上可行。采用级联式 FBG 传感器能降低外界噪声对光纤的影响, 提高对异常鼾声的分辨准确率。

### 4.2. 展望

本结构完成的是睡姿与鼾声监测有关的侧向压力传感, 在此基础上, 后续的研究可针对睡眠者的心率等体征参数。人心跳的频率为 0.5~1.3 Hz, 在使用光纤传感器监测睡眠者的心率时, 由于心跳的扰动, 床体上在心脏附近的 FBG 由于受到微弱的应力而导致中心波长的漂移, 并且呈现频率性的变化。心率能够通过测得的原始数据后通过 0.5~1.3 Hz 频率范围的带通滤波器加以滤波后得到心率信息。

目前已有的睡眠监测系统大都通过穿戴设备或将系统置于床垫内, 所使用的传感方法为电学感应方法, 使用精确度不高。而本文所述结构可直接设置在床体上, 因其结构设计使得系统更加精确。在床体上并添加睡姿调整, 鼾声干预等功能是未来睡眠监测的有效途径。

## 基金项目

海南省自然科学基金(123MS035, 120MS031); 大学生创新创业开放基金(榕树基金)资助(202211658003X, S202211658005X, S202211658007X, hsey2022-5); 教育部产学合作协同育人项目(220600532063222)资助。

## 参考文献

- [1] 李咏玲, 洪晓, 唐牛学, 蔡菁菁, 吴枫坪, 贾文齐. 基于人口老龄化智能家居的发展途径探索[J]. 青年与社会, 2020(17): 144-145.
- [2] Allen, J. (2007) Photoplethysmography and Its Application in Clinical Physiological Measurement. *Physiological Measurement*, **28**, R1-R39. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/3/R01>
- [3] Von Rosenberg, W., Chanwimalueang, T., Goverdovsky, V., et al. (2016) Smart Helmet: Wearable Multichannel ECG and EEG. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, **4**, 1-11. <https://doi.org/10.1109/JTEHM.2016.2609927>
- [4] Wang, F., Tanaka, M. and Chonan, S. (2002) A PVDF Piezopolymer Sensor for Unconstrained Cardiorespiratory Monitoring during Sleep. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, **16**, 181-188. <https://doi.org/10.3233/JAE-2002-236>
- [5] Gurkan, D., Starodubov, D. and Yuan, X. (2005) Monitoring of the Heartbeat Sounds Using an Optical Fiber Bragg Grating Sensor. *SENSORS, 2005 IEEE*, Irvine, 30 October 2005-3 November 2005, 4 p.
- [6] Peters, K. (2010) Polymer Optical Fiber Sensors—A Review. *Smart Materials and Structures*, **20**, Article ID: 013002. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/1/013002>
- [7] Wang, S., Ni, X., Li, L., et al. (2020) Noninvasive Monitoring of Vital Signs Based on Highly Sensitive Fiber Optic Mattress. *IEEE Sensors Journal*, **20**, 6182-6190. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2974313>
- [8] Koyama, Y. (2020) Monitoring Test for Bed Care Motion Using Smart Textiles Embedding a Hetero-Core Optical Fiber Sensor. 2020 *IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, Kobe, 13-16 October 2020, 553-554. <https://doi.org/10.1109/GCCE50665.2020.9291849>
- [9] Xu, W., Bian, S., Dong, B., et al. (2021) Unobtrusive Vital Signs and Activity Monitoring Based on Dual Mode Fiber. *Optical Fiber Technology*, **64**, Article ID: 102530. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102530>
- [10] Mizrahi, V. and Sipe, J.E. (1993) Optical Properties of Photosensitive Fiber Phase Gratings. *Journal of Lightwave Technology*, **11**, 1513-1517. <https://doi.org/10.1109/50.249888>