

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2109000

荧光原理的纸基张力传感器*

刘德全¹, 张巍巍¹, 伍林芳¹, 李凤¹, 叶强²

(1. 南昌航空大学江西省光电检测技术工程实验室 南昌 330063; 2. 南京体育学院体育教育与人文学院 南京 210014)

摘要:针对穿戴应用中传统传感器的穿戴体验差、成本高、构造复杂等问题, 本文将具有形变响应特性的荧光材料与纸张结合, 构建出荧光压谱原理的新型光学无线张力传感器。传感器的敏感材料是由罗丹明 B (RhB) 与 PDMS 混合成的复合荧光材料薄膜, 通过丝网印刷方式涂敷到美工纸带上。RhB 的荧光特征随着施加在纸带上的张力而改变, 在自制的力加载实验台上标定了该传感器的响应函数, 在 6 N 量程里其张力分辨率可达 0.04 N。借助手环和指套将该纸基张力传感器穿戴贴合于手部拇指关节, 实验证实可测量手指的屈伸姿态。这是首款基于非波导特性的光学力敏可穿戴器件, 具有柔性、亲肤、易回收、极低成本、几乎没有环境污染等显著优点, 可作为即用即抛的消费级传感产品用于人体健康评估、关节康复锻炼效果评价和机器人姿态控制。

关键词: 纸基传感器; 张力; 荧光

中图分类号: TH811 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Paper-based tension sensor using the fluorescence mechanism

Liu Dequan¹, Zhang Weiwei¹, Wu Linfang¹, Li Feng¹, Ye Qiang²

(1. Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. School of Physical Education and Humanities, Nanjing Sport Institute, Nanjing 210014, China)

Abstract: The wearable sensors have problems of poor experience, high cost and complex construction. To address these issues, an optically wireless tension sensor is developed with strain-sensitive fluorescent material painted on paper. The novel flexible probe uses the mixture of Rhodamine B (RhB) and PDMS as sensing material and the composite is screen printed onto a piece of fine art paper. The fluorescence characteristics of RhB are found linearly depending on the tension applied to the paper slice. Therefore, the sensing functions of the paper-based fluorescence sensor are calibrated on a customized force loading test bench. The constructed sensor is assembled to a wearable device. Then, the finger flexion could be successfully detected by the fluorescence. The finest resolution of the prepared sensor is 0.04 N over a measuring range of 6 N. This study presents an optical wearable tensiometer employing a non-lightguide principle for the first time. It has potential application in human health evaluation, rehabilitation exercise and joint posture monitoring.

Keywords: paper-based sensor; tension; fluorescence

0 引言

传感器是体域网 (body-area network, BAN) 的末梢, 能用来构建健康监测、运动姿态检测等用途的可穿戴设备^[1-4], 可穿戴传感器在医学诊断、重症监护、人体运动检测以及人机交互等实践中发挥着重要作用。在医学领

域, 捕捉手部动作进行手部健康评估在帕金森症诊断、手部外科手术康复等过程中是必不可少的^[5-6]。医学上早期使用的传感器直接借用了工业传感器, 具有较差的延展性, 因此用户的穿戴体验并不好。此外, 复杂的制备工艺和高昂的制造成本也限制了可穿戴传感器的应用和发展^[7-9]。因此, 开发生物兼容性好、易加工、结构简单、低成本的传感器是社会发展的现实需求。

收稿日期: 2021-12-09 Received Date: 2021-12-09

* 基金项目: 国家自然科学基金 (62005113)、江西省主要学科科学技术带头人-领军人才项目 (20204BCJL22041)、江苏省教育厅自然科学基金重大项目 (17KJA330001)、南昌航空大学研究生创新专项资金 (YC2021-090) 项目资助

针对人体应用的柔性传感器能克服或改善传统传感器的穿戴体验缺点^[10-11],其中,纸基传感器因其重量轻、柔韧性好、易于加工、性价比高、环境污染小等诸多优点而受到广泛关注^[12-13]。纸张的原料中含有丰富的纤维素,纤维素是地球上最丰富的天然聚合物,具有价格低廉、可再生、生物可降解性、无毒等诸多优点^[14]。一般的纸基传感器仍基于电信号的产生和传输,需要有线连接或者安装额外的无线信号发射器,这客观上增大了传感器的复杂性和成本并降低了其可靠性^[15-16]。光纤传感技术有可能集成到纸基器件上,但波导光路的布设和光信号的处理较电学传感方式更加复杂。

荧光压谱技术是一种可以将应力输入转换成荧光信号输出的光学测试技术,它具有超轻和低空间占有率的优势,能够免疫电磁干扰,荧光可以无线、远距离传输^[17]。本文首次尝试制作基于荧光压谱技术的纸基传感器,探索它在可穿戴人体检测方面的应用。

1 理论分析

荧光压谱技术的依据是荧光压谱效应,具体表现为材料在受到力的加载时其荧光光谱发生频移,物理机制是应力导致材料的原子间键长与键角改变,进而引起材料能级移动甚至跃迁选择定则破除。

荧光材料能便捷地以印刷或其它涂布工艺成型为纸上的薄涂覆层。荧光能够在自由空间传输,借助纸面的荧光压谱敏感层,可以实现光学无线检测纸下物体的形变。荧光压谱技术的这些特点与可穿戴技术的要求十分匹配。但是,压谱技术目前最典型的应用是航空发动机叶片热障涂层的残余应力检测,测量值一般在 GPa 量级,分辨率一般在几十 MPa 以上,无论是这个量级的应力值还是应力分辨都与人体可穿戴应用的要求相去甚远。

常规荧光压谱技术的敏感材料是 Cr^{3+} 或 Eu^{3+} 掺杂的金属氧化物,检测信号是最大光强的波长或波数。从压谱效应原理来看,任何荧光材料都具有力敏性,只不过灵敏度有差别。另外光谱寻峰精度限制了压谱分析精度。因此从敏感材料、光谱数据分析方法入手有可能降低压谱技术的检测限、提高分辨率,从而实现压谱技术的可穿戴应用。

从光谱的展宽机制角度来看,荧光谱呈尖锐的谱线意味着环境参量对电子能级的影响较小,所以 Cr^{3+} 或 Eu^{3+} 荧光的压谱系数较小($\sim 10 \text{ cm}^{-1}/\text{GPa}$)。从而,为了获得大的应力传感灵敏度,本文使用具有宽带荧光光谱的有机染料作为敏感材料。

常规的压谱数据分析方式是由光强比较判断方式读取或者由求导法寻极限的方式提取谱峰最大光强的波长

或波数,但寻峰精度会受制于光谱系统的信噪比及光谱分辨率。为了更精确地描述谱带位置,定义“谱重心”波长 λ_B 如式(1),它是将范围在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 的谱带的总面积均分为两个分段积分面积的波长。

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_B} I(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_B}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

其中,实测光强包括信号及噪声两部分, $I(\lambda) = I_S(\lambda) + I_N(\lambda)$, 噪声 $I_N(\lambda)$ 中除了计入系统噪声还同时计入光谱基线水平。白噪声在多次累加后趋近于 0, 而且荧光谱的基线在谱图上多数情况下是水平线,因此有式(2):

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_B} I_N(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_B}^{\lambda_2} I_N(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

进而 λ_B 的定义式等效于式(3)。

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_B} I_S(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_B}^{\lambda_2} I_S(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

可见,无需改变光谱系统硬件,基于实测光谱数据由式(1)可以直接得到天然去噪、去基线的近理想荧光信号 λ_B 。

将式(1)改写成除法式,并撤除谱重心波长定义的限制,得到荧光强度积分比 R 的定义如式(4)所示。

$$R = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_R} I(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_R}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

式中:波长 λ_R 为宽带光谱上两个积分范围的界限。积分强度比参量具有与谱重心法同样优良的降噪效果,同时,它的数据处理过程更加便捷快速,这一点利于实现可穿戴传感器的实时数据处理。

2 实验方法

2.1 样品制备

罗丹明(Rhodamine)作为一类常见的荧光染料,发光性能稳定、量子效率高,在荧光式传感技术中已经有着诸多应用,如光测力学实验中利用添加在高密度聚乙烯中的罗丹明 101 (Rh101) 研究材料的蠕变行为^[18]、罗丹明 B (RhB) 的荧光可以用于温度的传感测量^[19]。本文取用 RhB 作为力敏材料。实验传感器样品制作过程如图 1 所示:称取 0.05 g 的 RhB (分析纯)溶于 50 ml 的乙醇($\geq 99.7\%$, 分析纯),制成 RhB 的乙醇溶液;取溶液 1 ml 与 1.5 g 的 PDMS (Dow Corning 737) 充分搅拌混合,得到粘稠的浆料;然后将浆料以丝网印刷的方式涂布于美工纸带上;最后将样品在室温空气中存放一昼夜待浆料自然固化。最终成品样品如图 2 所示,总厚度 0.22 mm (纸厚 0.083 mm)、宽 10 mm、长 130 mm。

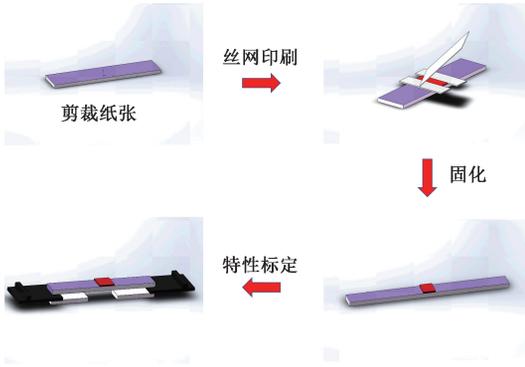


图1 荧光原理的纸基张力传感器制作流程

Fig. 1 Preparation process of the paper-based tension sensor

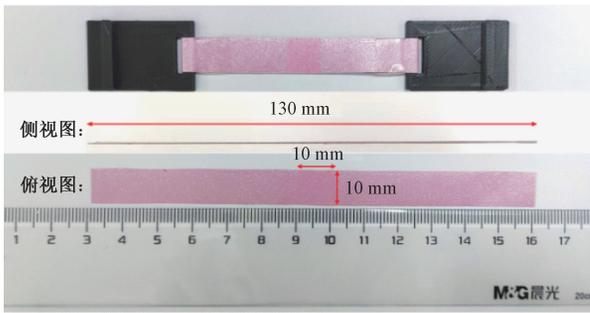


图2 样品大小

Fig. 2 Geometric dimension of the prepared sample

2.2 特性标定

在图3所示的光谱测试系统上标定实验样品的张力响应特性。其中,激发光源为中心波长405 nm的半导体激光器;由分辨率0.5 nm、光谱范围240~800 nm的光纤光谱仪(型号AvaSpec-2048TEC-USB2)分析样品的荧光;Y型分束光纤的一支光纤臂与激光器耦合,向样品传输激发光,另一支光纤臂连接光谱仪,传输样品的荧光,合束端对准被测样品,同时传输激发光与荧光。为了让拉力均匀地施加到样品上并且防止样品在测试过程中的滑

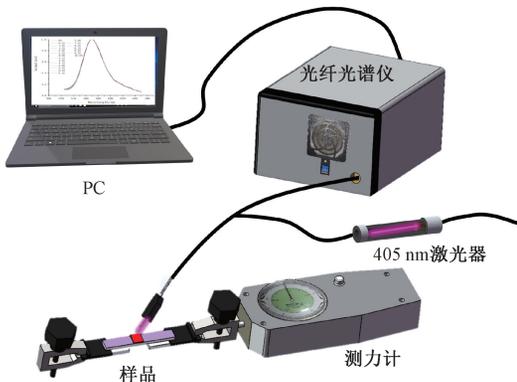


图3 光谱测试与张力特性标定系统

Fig. 3 Spectroscopic and tension calibration system

动,将纸带卷绕夹持在自行设计、3D打印制作的夹头上再用测力计的金属夹头夹紧,如图4所示。实验中使用的测力计的工作范围0~10 N、分辨率0.05 N。在室温条件下,通过转动螺杆驱动测力计缓慢平移对样品加载拉力,拉力加载步长0.05 N、最大10 N,记录样品随拉力的增加而变化的荧光光谱。

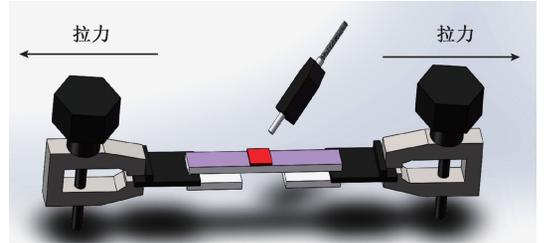


图4 实验样品的力加载方式

Fig. 4 Configuration of the force loading fixture under spectroscopic analysis

3 数据分析

3.1 样品表征

采用探测光波长1300 nm、扫描速度范围5.5~76 kHz、分辨率5.5 μm的OCT系统(Thorlabs-TEL220C1)分析测量荧光薄膜的三维光学层析图像以及表面状况。

荧光复合薄膜的三维光学层析图像(OCT)如图5所示,样品膜层厚度均匀,未施加拉力时平均厚度为 $137.9 \pm 2.7 \mu\text{m}$,当施加6 N拉力时,平均厚度为 $137.7 \pm 1.3 \mu\text{m}$;膜层内部没有光反射区,表明膜层内没有气泡、团聚等非均匀因素;由图6所示,荧光膜层表面比较平滑,表面粗糙度的特征尺度小于OCT系统的空间分辨力极限(5.5 μm)因而不能在OCT表征中测量。传感器样品复合结构的这种均匀性和一致性将能有效地保证纸质基底的受力变形能很好地传递到荧光薄膜上,这是传感器样品传感特性具有良好的准确性和重复性的必要条件。

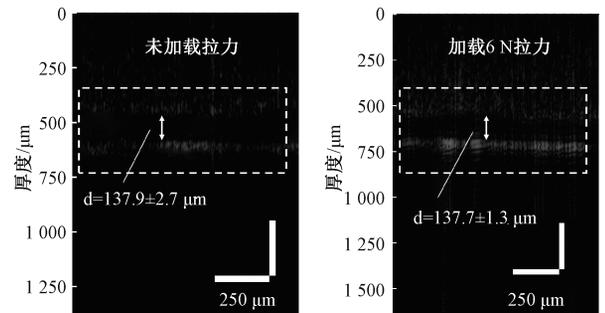


图5 膜层厚度方向剖面图

Fig. 5 Cross section of the printed RhB/PDMS composite film before/after tension loading

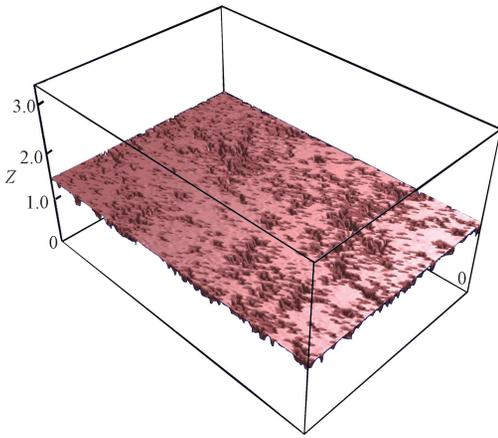


图 6 OCT 观测的薄膜表面形貌

Fig. 6 Surface topography of the printed composite film

在传感特性标定前预先通过机械拉伸试验评估同一批制作的同等样品的力学性能, 并确定其受力的极限值以限定最终传感器的量程。根据表 1 所列的实测应力与应变的数据计算得到纸基样品的弹性模量约为 136 MPa, 在大于 6.5 N 拉力下开始发生明显的非弹性形变。实验样品传感器的测量范围可定为 0~6.5 N。

表 1 纸基材料弹性模量计算数据

Table 1 Typical behavior of the paper slice under tension

拉力/N	长度/mm	厚度/mm	宽度/mm
0	61.48	0.22	10.00
3	62.10	0.22	10.00

3.2 传感特性

图 7 展示了实验样品在加载不同大小的拉力时的荧光发射光谱。图中的光谱可以区分为两个波段, 其中 400~525 nm 的部分源于作为传感器衬底的纸基材料自身的荧光。本研究主要利用 RhB 的荧光作张力传感应用, 纸基材料选材可以比较随意, 其荧光特性重复性较差, 不考虑研究它的荧光的环境敏感性。

为了方便观察, 将原始荧光发射光谱在 RhB 荧光峰值强度处作归一化处理, 如图 8 所示, 可以观察到微弱的谱峰移动。从图 8 右上角对归一化发射光谱图局部放大的插图可以发现, 荧光谱带随拉力的增大略有蓝移趋势, 这种移动在极少的文献中有过报道, 如图 9 所示 Rh101 的应力频移^[18]。荧光光谱随染料分子受力而移动, 它的物理机制概略地是源于分子构型在微区应力作用下发生改变, 从而引起分子能级的移动。这种谱移动现象与红宝石 (Al₂O₃:Cr³⁺)、无机稀土氧化物等发光材料的荧光压谱效应相似, 可以视为有机染料的荧光压谱效应^[20]。

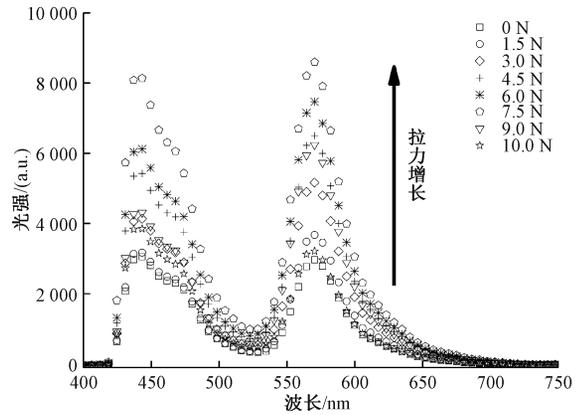


图 7 加载拉力的样品的荧光发射谱

Fig. 7 Fluorescence emission spectra of the sample under tension loading

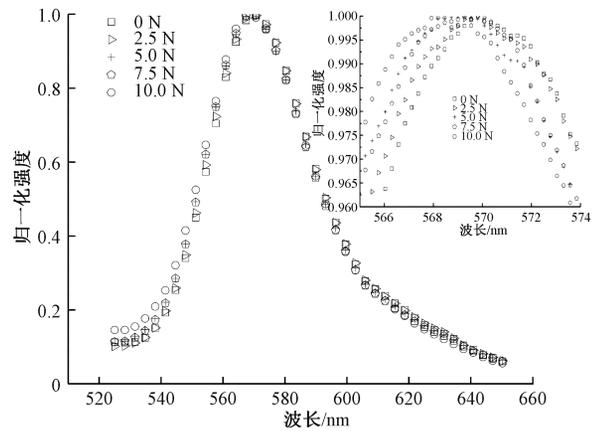


图 8 归一化的罗丹明 B 荧光发射谱

Fig. 8 Normalized emission spectra of the RhB fluorescence

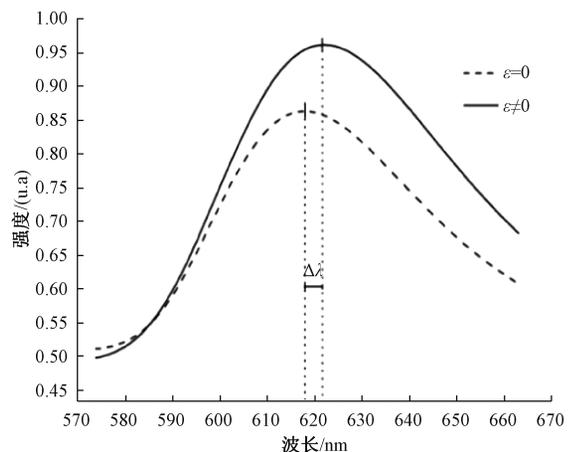


图 9 罗丹明 101 样品的荧光发射光谱图^[18]

Fig. 9 Fluorescence emission spectra of Rhodamine 101 samples^[18]

一般表征谱峰的移动都是读取峰值波长,但显然本实验中受限于小量程以及光谱系统的低信噪比,峰移动量微小、寻峰操作噪声较大,蓝移规律不显著。为了提高谱峰的寻峰精度,采用新型的“谱重心”参量^[20-22]分析荧光峰的移动。

图 10 是单一样品荧光发射光谱的谱重心波长随张力变化的数据曲线,数据点的误差项由多次重复测量该样品得到。对实验数据作线性拟合,得到传感方程 $\lambda_b = 575.36 - 0.19F$ 。实验数据的拟合优度为 0.958,表明回归直线对观测值的拟合程度较好,线性传感方程可信;实验样品的传感灵敏度为 0.19 nm/N、灵敏度拟合相对误差为 6.1%;非线性误差为 3.4 % FS。又对同一批次制作的多个样品作多次测量,实验结果如图 11,删去明显坏点,得到传感系统的重复性为 3.7% FS。将传感方程零次项的不确定度作为实验系统的检测限,计算它与灵敏度的比值,得到谱重心信号检测实验系统的分辨力为 0.08 N。

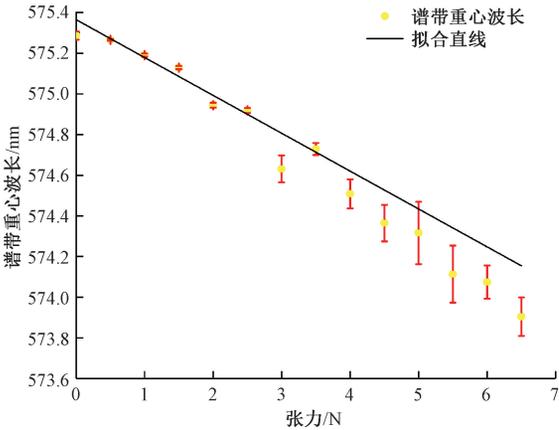


图 10 样品的谱重心波长随张力变化的规律

Fig. 10 Barycenter wavelength changes with tension loading

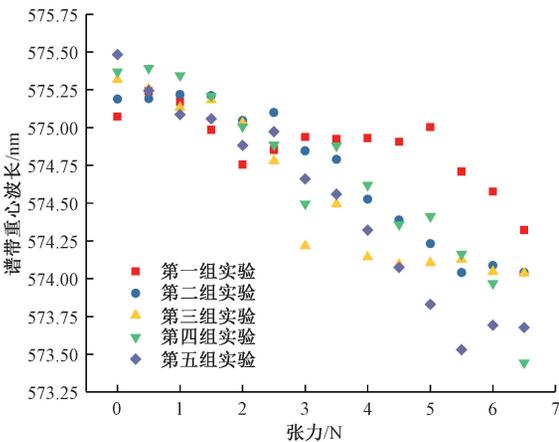


图 11 谱重心作为传感信号重复测量张力

Fig. 11 Emission barycenter responses to tension of various samples

图 12 展示了积分强度比参量受张力的影响。对实验数据作线性拟合得出积分强度比的张力传感方程为 $R = 0.644 + 0.012F$; 线性拟合优度 0.985; 灵敏度为 0.012 N/RU, 灵敏度拟合相对误差为 3.6%; 非线性误差 1.2 % FS; 据图 13 去除明显坏点后得到重复性为 0.2 % FS。与谱重心传感的计算方式相同,得到积分强度比实验系统的分辨力为 0.04 N。

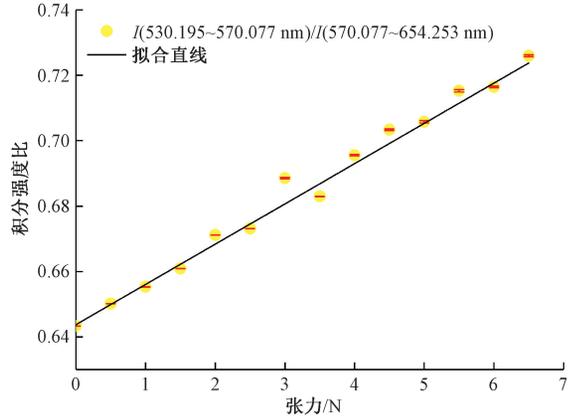


图 12 样品的积分强度比随张力变化的规律

Fig. 12 Changes of integral intensity ratio at various tension

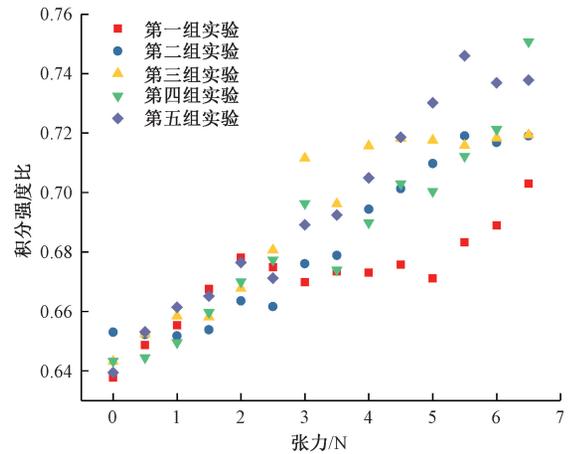


图 13 积分强度比作为传感信号重复测量张力

Fig. 13 Integral intensity ratio's response to tension of various samples

谱重心参量和积分强度比参量作为张力传感信号方程均能够分辨 0.08 N 以下的张力,传感系统的最高精度达到 0.67% (= 0.04 N/6 N),表明实验中制作的张力传感器原型器件已能满足实际应用需求。

4 实际应用

用已标定了传感性能的荧光原理的纸基张力传感器连接 3D 打印制作的手环和指套,如图 14 左上角插图所

示,穿戴到手上,构造成为一种检测拇指弯曲动作的装置,在自制的曲伸角检测台(如图14右下角插图)上对比使用。实验过程中,手掌贴合平台,拇指贴合倾斜面。拇指弯曲角度由 0° 开始,步长为 5° ,最大弯曲到 30° ,每次改变弯曲角度后记录一次荧光发射光谱,通过谱重心法的传感函数: $\lambda_b = 575.36 - 0.19F$ 计算出该穿戴式传感器上对应的张力,如图14所示。测量过程中始终保持激发光源对准RhB/PDMS复合荧光材料薄膜。

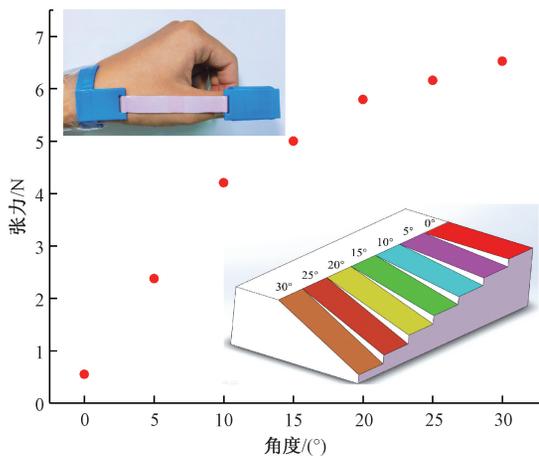


图14 拇指弯曲角度变化对应的张力

Fig. 14 Tension changes at various bending angles of the thumb

由测量结果可见,拇指弯曲角度为 0° 时,纸基传感器与皮肤处于松弛的贴合状态,张力为0;当弯曲角度逐渐增大,由于纸基传感器连接装置两端被固定,纸基张力传感器被拉伸,敏感材料的荧光发射光谱随之发生变化,测得张力单调地增大。受限于传感器的测量上限,验证实验中最大弯曲角为 30° 。

该实验证明纸基荧光式传感器具有低检测限和高灵敏度,实验制作的可穿戴装置能够感应到拇指的弯曲状态和弯曲运动。对比而言,大多数可穿戴器件可测量弯曲角度需大于 30° 甚至需要手指弯曲达到 90° ^[23-25]。小于 5° 的角分辨和达到 30° 的测量范围更适应医疗应用中人体穿戴的需求,例如偏瘫患者的复健需要精细地训练手指与手指关节活动的协调以重塑患者手部的运动神经,帕金森患者的手部震颤也是小角度的。此外,与光纤传感器相比,作为本研究的传感器衬底的纸张显然具有更好的穿戴体验和更低的成本。

5 结 论

纸张是柔性张力传感器的良好载体,RhB/PDMS复合荧光材料印制到纸上形成的张力传感器的最高分辨力达到 0.04 N ,实际验证可用于手指曲伸等手部动作的监

测。实验结果表明,该荧光式无线纸基张力传感器用于拇指弯曲角度检测能够测量一般传感器不能测量的 30° 以下小角度弯曲。传感信号采用光学无线方式传输,应用中手部活动自由度大。

这种新型的柔性传感器具有制造简单、使用方便快捷、价格低廉、无线检测张力及曲伸姿态等诸多优点,在可穿戴医疗、运动检测方面有良好的应用前景。

参考文献

- [1] MAHESHWARI V, SARAF R. High-resolution thin-film device to sense texture by touch [J]. Science (New York, N. Y.), 2006, 312(5779): 1501-1504.
- [2] MEYER J, LUKOWICZ P, TROSTER G. Textile pressure sensor for muscle activity and motion detection [C]. 2006 10th IEEE International Symposium on Wearable Computers, IEEE, 2006: 69-72.
- [3] RUKHSANA D, RAMLI N A, NORDIN A N. Development of low-cost, kirigami-inspired, stretchable on skin strain sensors using tattoo paper [C]. 2021 IEEE 7th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA), IEEE, 2021: 146-151.
- [4] NASSAR J M, MISHRA K, LAU K, et al. Recyclable nonfunctionalized paper-based ultralow-cost wearable health monitoring system [J]. Advanced Materials Technologies, 2017, 2(4): 1600228.
- [5] HENDERSON J, CONDELL J, CONNOLLY J, et al. Reliability and validity of clinically accessible smart glove technologies to measure joint range of motion [J]. Sensors, 2021, 21(5): 1555.
- [6] DAVARZANI S, PAJOUH M A A. Design and fabrication of sensing system for rehabilitation of finger [C]. 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), IEEE, 2020: 1-5.
- [7] XU K, LU Y, TAKEI K. Multifunctional skin-inspired flexible sensor systems for wearable electronics [J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(3): 1800628.
- [8] BESSONOV A, KIRIKOVA M, HAQUE S, et al. Highly reproducible printable graphite strain gauges for flexible devices [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 206: 75-80.
- [9] PARK J, YOU I, SHIN S, et al. Material approaches to stretchable strain sensors [J]. Chem. Phys. Chem, 2015, 16(6): 1155-1163.
- [10] HAN S T, PENG H, SUN Q, et al. An overview of the development of flexible sensors [J]. Advanced Materials,

- 2017, 29(33): 1700375.
- [11] THIYAGARAJAN K, RAJINI G K, MAJI D. Flexible, highly sensitive paper-based screen printed mwent/pdms composite breath sensor for human respiration monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(13): 13985-13995.
- [12] GUO Y, ZHONG M, FANG Z, et al. A wearable transient pressure sensor made with MXene nanosheets for sensitive broad-range human-machine interfacing [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(2): 1143-1150.
- [13] LI W, XIONG L, PU Y, et al. High-performance paper-based capacitive flexible pressure sensor and its application in human-related measurement [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14(1): 1-7.
- [14] XU X, ZHOU J, NAGARAJU D H, et al. Flexible, highly graphitized carbon aerogels based on bacterial cellulose/lignin: Catalyst-free synthesis and its application in energy storage devices [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(21): 3193-3202.
- [15] KANAPARTHI S, SEKHAR V R, BADHULIKA S. Flexible, eco-friendly and highly sensitive paper antenna based electromechanical sensor for wireless human motion detection and structural health monitoring[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2016, 9(2): 324-330.
- [16] ZHANG J, LEE G Y, CERWYN C, et al. Fracture-induced mechano-electrical sensitivities of paper-based nanocomposites[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(3): 1700266.
- [17] ZHANG W W, QIN C F, XU R H, et al. Fluorescence stress sensing with SrSiAlN₃: Eu²⁺ + phosphor-silicone composite[J]. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 2018, 25(5): 417-420.
- [18] BOUVET G, DOUMINGE L, FEAUGAS X, et al. Fluorescence spectroscopy applied to study cyclic creep behaviour and internal stresses of semi-crystalline high-density polyethylene [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(2): 024901.
- [19] 张巍巍, 史凯兴. 基于染料荧光多个特征的光纤温度传感器 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(11): 2620-2627.
- ZHANG W W, SHI K X. A fiber optic temperature sensor based on multiple fluorescence characteristics of a dye [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(11): 2620-2627.
- [20] 张巍巍, 程浩, 肖慧荣, 等. 荧光式传感技术研究进展[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(4): 1-13.
- ZHANG W W, CHENG H, XIAO H R, et al. Advances of fluorescence-based sensing technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(4): 1-13.
- [21] ZHANG W, WANG G, CAI Z, et al. Spectral analysis for broadband fluorescence: Temperature sensing with the YAG: Ce phosphor as an example[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(11): 3482-3490.
- [22] ZHANG W, LI Z, BAXTER W, et al. Stress-and temperature-dependent wideband fluorescence of a phosphor composite for sensing applications [J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 57(1): 57-63.
- [23] DONG W, YANG L, FORTINO G. Stretchable human machine interface based on smart glove embedded with PDMS-CB strain sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(14): 8073-8081.
- [24] LI X, KOH K H, FARHAN M, et al. An ultraflexible polyurethane yarn-based wearable strain sensor with a polydimethylsiloxane infiltrated multilayer sheath for smart textiles [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(6): 4110-4118.
- [25] GAO M, LI L, SONG Y. Inkjet printing wearable electronic devices[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(12): 2971-2993.

作者简介



刘德全, 2020年于甘肃农业大学获得学士学位, 现为南昌航空大学测试与光电工程学院硕士研究生, 主要研究方向为荧光传感技术。

E-mail: ldq6815@163.com

Liu Dequan received his B. Sc. degree from Gansu Agriculture University in 2020. He is currently a master student at Nanchang Hangkong University. His main research interest is fluorescent sensing technique.



张巍巍(通信作者), 1996年和2001年于中国科学技术大学分别获得学士学位和博士学位, 现为南昌航空大学测试与光电工程学院副教授, 主要研究方向为荧光传感技术及光纤传感技术, 压电及半导体传感器的研发。

E-mail: zdw@ustc.edu

Zhang Weiwei (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from University of Science and Technology of China in 1996 and 2001, respectively. He is currently an associate professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include fluorescent sensing techniques and fiber optic sensors.