

文章编号: 1000-7032(2026)08-1317-09

人体耦合驱动的交流场致发光湿敏可视化薄膜传感器

梁瑞霞, 李克睿, 李耀刚, 张青红*, 侯成义*, 王宏志

(东华大学 材料科学与工程学院, 先进纤维材料全国重点实验室, 上海 201620)

摘要: 随着可穿戴电子、智能感知和柔性交互技术的快速发展, 人机交互系统对信息反馈的实时性、直观性和便捷性提出了更高要求。作为一种新兴的人机交互技术平台, 基于交流场致发光的可视化传感器能够将外界刺激直接转化为光学信号, 推动了人机交互平台的发展。但现有场致发光可视化传感器普遍依赖外接交流激励, 仍存在系统刚性较强、集成度有限以及对微弱刺激可视化转换能力不足等问题。针对上述问题, 本文开发了一种基于场致发光的湿敏可视化薄膜传感器。该传感器采用多层柔性结构设计, 主要由皮肤黏附层、导电层、发光层和传感层组成。在相对湿度 40%~95% 范围内, 当离子液体[EMIM][TFSI]质量分数为 2% 时, 传感器展现出优异的高对比光学响应特性。同时, 它具有良好的贴肤性、柔韧性与可拉伸性, 可稳定附着于人体表面并适应复杂形变。我们通过将交流电致发光与湿度传感凝胶结合, 构建湿度诱导发光机制, 实现了对湿度的直观可视化响应。同时, 通过人体与环境电磁场之间建立的能量传输回路, 该传感器无需传统刚性供电单元即可实现无线驱动, 提升了便携性与应用灵活性。进一步地, 该传感器能够利用人体皮肤的自然湿度, 实现非接触式可视化交互, 为构建柔性、无线、可感知的人机界面提供了新的设计思路, 并展现出其在智能交互显示与可穿戴电子领域的应用潜力。

关 键 词: 无线驱动; 可视化传感; 非接触交互

中图分类号: O482.31; TP212

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260085

CSTR: 32170.14.CJL.20260085

Alternating Current Electroluminescent Humidity-sensitive
Visualized Film Sensor Driven by Body Coupling

LIANG Ruixia, LI Kerui, LI Yaogang, ZHANG Qinghong*, HOU Chengyi*, WANG Hongzhi

(State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, College of Materials Science and Engineering,

Donghua University, Shanghai 201620, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zhangqh@dhu.edu.cn; hcy@dhu.edu.cn

Abstract: With the rapid development of wearable electronics, intelligent sensing, and flexible interactive technologies, human-machine interfaces are demanding increasingly real-time, intuitive, and convenient modes of information feedback. As an emerging platform for human-machine interaction, alternating current electroluminescence-based visual sensors can directly convert external stimuli into optical signals, thereby advancing the development of human-machine interaction. However, existing visual sensors generally rely on external alternating current excitation and still suffer from limited flexibility, insufficient system integration, and an inadequate ability to convert weak stimuli into clearly discernible visual signals. To address these issues, this paper presents a humidity-sensitive visual film sensor based on field-induced luminescence. The sensor adopts a multilayer flexible architecture consisting of a skin-adhesive layer, a conductive layer, a luminescent layer, and a sensing layer. Within the relative humidity (RH) range of 40%–95%, the sensor exhibits a pronounced high-contrast optical response at an ionic liquid ([EMIM][TFSI]) mass fraction of 2%. Owing to its excellent conformability, flexibility, and stretchability, it can be stably laminated onto the human body and readily accommodate complex deformations.

收稿日期: 2026-03-18; 修订日期: 2026-03-30

基金项目: 国家重点研发计划(2025YFF0524800)

Supported by National Key Research and Development Program of China (2025YFF0524800)

By integrating alternating-current electroluminescence with a humidity-responsive gel, we established a humidity-induced luminescence mechanism that enables direct visual readout of humidity variations. Meanwhile, through an energy-transfer pathway established between the human body and the ambient electromagnetic field, the film can be wirelessly driven without the need for a conventional rigid power supply, thereby improving both portability and operational versatility. Furthermore, by exploiting the natural humidity of human skin, the film enables contactless visual interaction, offering a new design strategy for flexible, wireless, and perceptive human-machine interfaces, and demonstrating its potential for applications in smart interactive displays and wearable electronics.

Keywords: wireless actuation; visualized sensing; contactless interaction

1 引 言

可视化传感器因能够将外界刺激直接转化为可观察的光学信号,近年来在可穿戴电子、生物传感和新兴交互电子技术等领域展现出重要应用潜力。因此,研究人员已开发出多种可视化传感体系,如热致变色^[1-2]、力致变色^[3-4]、光致变色^[5]以及电致变色^[6-7]等类型。然而,这些传感器仍以被动显色或外部激发为主,例如依赖环境光和外加光源实现颜色变化,或需要外加电压驱动电致变色过程,在系统集成度和可穿戴方面仍存在一定局限。交流场致发光传感器凭借器件结构简单、响应直观、易于大面积显示以及可与柔性基底良好集成等优势,已成为构建可视化传感与交互系统的重要技术路径^[8-11]。通过将压力^[12-15]、温度^[16-17]、湿度^[7,18-19]和气体^[20-21]敏感材料与场致发光单元的耦合,已发展出一系列面向多种外界刺激感知与信号直接可视化输出的传感器。这类器件通常通过改变介电特性、电阻、电容或界面极化行为影响光信号的输出。然而,现有多数场致发光传感器仍依赖与交流激励源的物理连接^[11,22-23]。这种工作方式不仅使传感器呈现出一定的刚性特征,难以适应复杂界面上的动态形变,还进一步增加了系统复杂度。此外,场致发光过程通常具有一定的电场激发阈值和非线性响应特征^[24-25],导致微弱外界刺激难以有效调控局部电场并转化为显著的光学输出,这也在一定程度上制约了其在高灵敏可视化交互场景中的应用。

此前,本团队提出了一种基于人体耦合的能量交互机制,在单根纤维中成功集成了无线供能、光信号输出和电信号发射三种功能^[26]。在此基础上,进一步以 ZnS:Cu²⁺ 荧光粉作为光学媒介,利用

传感纤维表面界面阻抗的变化,实现了多节点、直观化的可视化传感^[27]。随后,本团队又将该机制拓展到集传感、记忆与可视化协同于一体的仿生器件中,进而发展出具有更高集成度的人工触觉系统^[28]。上述研究表明,人体耦合能量交互机制能够实现对柔性传感器件的驱动与传感。因此,基于该机制本文开发了一种基于场致发光的湿敏可视化薄膜传感器。该传感器以电子皮肤的形式贴附于人体表面时,与人体共同构建电磁能量回路,从而实现器件的无线驱动。随着外界相对湿度(RH)的变化,传感层导电性改变,进而影响器件内部有效激发电场的建立。当荧光粉周围电场强度达到其发光阈值时,即可诱导发光,从而将原本难以直接转化的微弱湿度刺激转变为可辨识的光信号。本文对其工作机制进行了进一步分析并展示了传感器对手指接近和口呼吸等非接触湿度刺激的可视化响应能力,为构建集无线驱动、非接触式交互与视觉反馈于一体的柔性交互平台提供了新的设计思路。

2 实 验

2.1 湿敏可视化薄膜传感器制备

称取适量 ZnS:Cu²⁺ 荧光粉与 PDMS 混合制备发光浆料,其中 PDMS 预聚体与固化剂预先按质量比 10:1 混合,再与荧光粉按质量比 1:2 混合,充分搅拌 10 min 后进行真空脱泡,得到均匀的发光浆料。PVP 则与 DMF 按质量比 1:9 混合,持续搅拌直至得到均一溶液,随后将离子液体[EMIM][TFSI]分别按其质量的 1%、2%、3%、5% 和 10% 加入,持续搅拌 6 h 直至完全均匀,得到湿度传感凝胶。另外,将 PDMS、固化剂和 PEG 400 按质量比 75:5:3 混合,制得皮肤黏附层材料。

将发光浆料以 1 500 r·min⁻¹ 速度旋涂成膜,并

在80℃下固化1h后形成发光层。随后对薄膜表面进行O₂等离子体处理,采用丝网印刷方式在其表面制备可拉伸银浆导电层。待导电层固化后,将皮肤黏附层材料以800 r·min⁻¹速度旋涂于其上,并在70℃下固化2h。之后,将所得薄膜转移至另一块玻璃基板上,再于发光层表面以500 r·min⁻¹速度旋涂湿度传感凝胶。最后,经70℃干燥成膜后,获得湿敏可视化薄膜传感器。

2.2 实验试剂与仪器

实验试剂:聚乙烯吡咯烷酮(PVP, $M_w=1\,300\,000$, 阿拉丁化学有限公司)、1-乙基-3-甲基咪唑双三氟甲磺酰亚胺盐([EMIM][TFSI], 上海默尼科技)、ZnS:Cu²⁺荧光粉(中国上海科炎光电技术有限公司)、聚二甲基硅氧烷(PDMS, 美国陶氏康宁公司)、可拉伸银浆(深圳羿莱科技有限公司)、聚乙二醇400(PEG 400, 国药集团化学试剂有限公司)。波形发生器(33600A, Keysight)和高压放大器(ATA-7050, Agitek)提供交流电,并采用CE1500005T型号直流电源(Rainworm)和交流升压模块(光奥电子)提供无线电场。

2.3 样品性能及表征

采用场发射扫描电子显微镜(SEM, MERLIN 卡尔·蔡司)表征薄膜的截面和表面微观形貌,使用数码相机(索尼α6300, 日本)捕捉光学图像。通过万能试验机(Instron 5969, Instron Corporation, 美国)测试交互薄膜的机械性能。使用光功率计(2936-R, Newport Corporation, 中国)和光谱仪(SEK, Choptics Instruments, 中国)测试发光强度。电导采用LCR数字电桥(VC4090A, 中国)进行记录。使用恒温恒湿箱(上海一恒科学仪器有限公司)控制相对湿度。传感器通过在含有不同的饱和盐溶液的溶液瓶中快速转移实现不同相对湿度的快速切换。

3 结果与讨论

3.1 湿敏可视化薄膜传感器结构及发光特性

图1(a)展示了湿敏可视化薄膜传感器作为非接触交互传感界面的应用场景。传感器从上到下主要由皮肤黏附层、导电层、发光层和传感层构成,其中传感层由PVP溶液和离子液体[EMIM][TFSI]混合后的凝胶构成。层状结构在图1(b)横截面SEM图中清晰可见。图1(c)为传感器传感层表面的SEM图像,可以观察到其表面致密光

滑,表明聚合物网络交联有效且离子液体分散均匀。为优化传感层湿度响应性能,研究了不同离子液体质量分数下传感器在交流电源(300 V, 2 kHz)下的发光响应,结果如图1(d)所示。相较于其他组分,作为湿度传感层的凝胶中离子液体质量分数为2%时,传感器表现出最大的光功率变化,这是由于离子液体的吸湿疏水特性^[29-30]。当离子液体含量较低时,难以改变传感层导电性;含量较高时,疏水基团过多,水分子在表面难以铺展,无法进入内部结构,仍然导致吸湿能力下降。同时,过量的离子液体可能使得传感层在低湿度条件下已经具有较高的离子极化能力,削弱了湿度对发光强度的影响。因此,2%可作为诱导场致发光荧光粉发光的最佳离子液体含量。此外,还通过改变旋涂速度,制备了一系列不同传感层厚度的湿度响应薄膜。不同传感层厚度对发光强度的影响如图1(e)所示。随着传感层厚度增加,传感器的诱导发光能力逐渐增强。传感器的响应和恢复时间定义为水分子在吸附和脱附过程中电导变化达到稳态值90%所需的时间。考虑到传感器的动态响应过程,对具有不同传感层厚度的器件在相对湿度快速变化(30%~95% RH)过程中的响应时间和恢复时间进行了测试,如图1(f)所示。结果表明,随着旋涂速度增加,响应和恢复时间逐渐减小。为使传感器具有良好的传感可视化能力,选择500 r·min⁻¹作为凝胶传感层制备参数。图1(g)表明,传感器的光响应与电导变化在快速湿度变化下呈现出高度相关性。图1(h)中光功率密度与湿度变化的关系图也表明了传感器发光强度与相对湿度的正相关。这种相关性主要归因于湿敏可视化薄膜传感器中传感层导电性的增加。

3.2 湿敏可视化薄膜传感器无线交互显示原理

为阐明传感层的湿度响应机制,在不同相对湿度条件下对凝胶进行了电化学阻抗谱测试,如图2(a)所示。不同相对湿度下的复阻抗谱均一致表现出高频半圆和低频线性区域,表明其响应过程与凝胶的固有阻抗、离子扩散有关,如图2(b)、(c)。在相对低湿度下,仅有少量水分子通过氢键与羰基极性基团和咪唑阳离子结合,离子迁移困难,导致凝胶阻抗较高。随着湿度升高,水分子向内部扩散与更多极性位点结合。同时,也会与咪唑阳离子形成氢键,使离子迁移更容

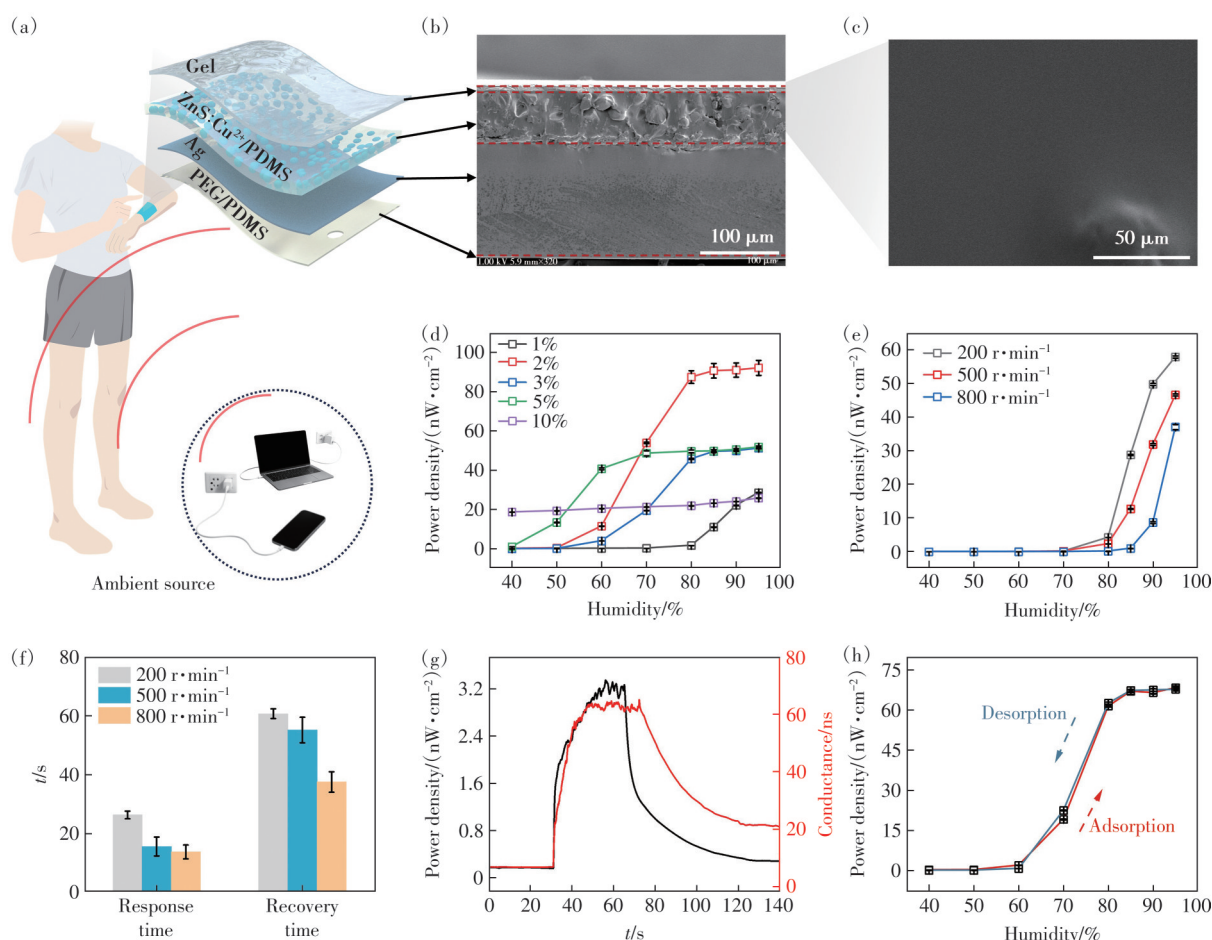


图1 湿敏可视化薄膜传感器结构及发光特性。(a)器件结构示意图;(b)器件横截面的SEM图;(c)凝胶传感层的表面微观形貌;(d)不同离子液体含量下器件在不同相对湿度下的光功率密度;(e)具有不同凝胶厚度的器件随相对湿度变化的光响应曲线;(f)具有不同凝胶厚度的器件在快速湿度变化下的响应/恢复时间;(g)器件在快速湿度变化下的响应曲线;(h)器件随相对湿度升降的光功率密度变化曲线。以上实验数据误差棒均由三次独立实验计算得出,数据以平均值±标准差表示

Fig.1 Structure and luminescence properties of the humidity-sensitive visual film sensor. (a) Schematic illustration of sensor structure. (b) Cross-sectional SEM image of the sensor. (c) Surface microstructure of the gel sensing layer. (d) Power density of the sensor at different relative humidity levels under varying ionic liquid contents. (e) Power density of the sensor with different gel thicknesses at different relative humidity levels. (f) Response/recovery time of sensor with different gel thicknesses under rapid humidity changes. (g) Response curve of the sensor under rapid humidity changes. (h) Power density of the device as a function of increasing and decreasing relative humidity. All error bars were calculated from three independent experiments, and the data are presented as mean $\pm$ standard deviation

易^[31-33]。在相对高湿度下,水分子之间进一步形成连续的通道,体系的离子迁移能力和界面极化能力增强,使凝胶阻抗明显下降。这为传感器耦合环境电磁能进而驱动湿度诱导发光提供了必要条件。湿敏可视化薄膜传感器无线发光原理如图2(d)、(e)所示。相比空气,人体具有较高的介电常数和电导率,电磁能量会优先穿过人体回到大地。这一特性决定了当湿敏可视化薄膜传感器的导电层与人体接触时,电磁能量会优先穿过薄膜、

人体并返回大地。传感器通过耦合电场,与大地、人体构成了一个能量回路^[26]。随着湿度逐渐增加,传感层中的离子和水分子更容易在电磁场的影响下发生空间电荷和取向极化,从而使大部分电磁能量通过空间电荷与定向束缚电荷传递到荧光颗粒周围。当电极与凝胶层之间的电场强度达到荧光粉的发光阈值时^[34],诱导荧光粉发光。由于不同湿度条件下传感层的空间电荷积累和极化程度不同,传感器表现出不同的发光强度。

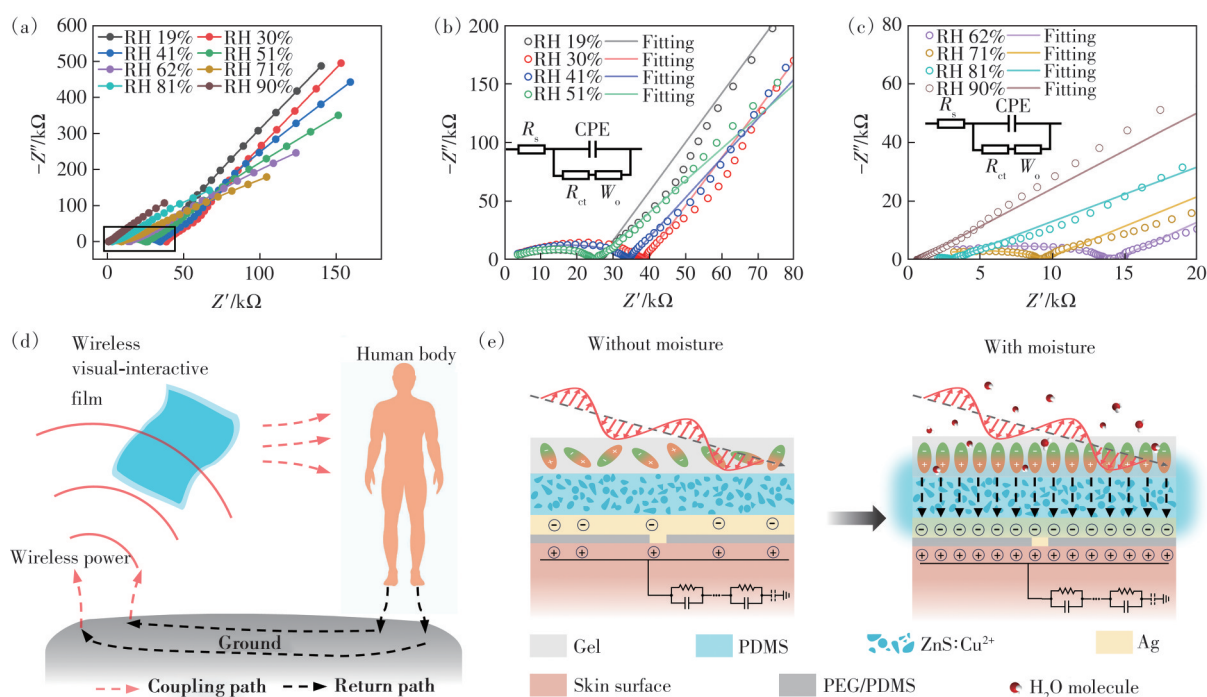


图2 湿敏可视化薄膜传感器无线交互显示原理。(a)不同相对湿度下器件的EIS图谱;(b)~(c)图(a)左下角由黑色矩形标记区域的放大图;(d)无线驱动机制示意图;(e)无线驱动发光原理图

Fig.2 Mechanism of wireless interactive display in the humidity-sensitive visual film sensor. (a)The EIS spectra of the sensor under different relative humidity levels. (b)~(c)Enlarged views of the region marked by the black rectangle in the lower-left corner of (a). (d)Schematic illustration of the wireless driving mechanism. (e)Schematic diagram of the mechanism of wireless-driven luminescence

3.3 湿敏可视化薄膜传感器性能

在无线驱动湿度诱导发光的过程中,人体与传感器之间的稳定贴合至关重要。图3(a)表明,湿敏可视化薄膜传感器的黏附层具有良好的皮肤附着能力,可满足贴肤需求。考虑到传感器在实际应用中需适应人体运动引起的形变,对各层拉伸性能进行了进一步评估。如图3(b)所示,由于荧光粉填充在PDMS基体当中,ZnS:Cu²⁺/PDMS薄膜拉伸应变性能有限。引入PEG后的PDMS拉伸应变能力约为原始PDMS的3倍。与PDMS相比,PEG/PDMS薄膜皮肤黏附力提升约91%,并在90% RH环境中放置7天后,黏附力仍保持较高水平,如图3(c)所示。湿敏可视化薄膜传感器整体具有良好的柔韧性,如图3(d)所示。此外,拉伸状态下的发光稳定性对可视化交互显示同样具有重要意义。图3(e)展示了湿敏可视化薄膜传感器在不同相对湿度及拉伸状态下的可视化发光行为。随着相对湿度从30%增加到90%,发光面积和亮度明显增加。即使在40%的拉伸应变下,仍然表

现出相应的湿度诱导发光。除此之外,在应变从0%增加到50%后,发光面积及亮度依旧保持初始水平,如图3(f)所示。这可能是由于发光层和传感层在拉伸过程中厚度均会减小,二者对电场分布的影响相互抵消,从而维持了整体发光性能的稳定性。然而,当拉伸应变进一步增大至60%时,由于导电层的应变承受能力有限,导电通路受到破坏,导致器件发光面积明显下降,如图3(g)。在70% RH下,传感器经过1 000次50%拉伸应变后,光功率密度下降不到10%,表明其具有较好的发光稳定性和抗拉耐久性,如图3(h)。在上述讨论中,我们知道湿敏可视化薄膜传感器对湿度的响应呈现出非线性特征,具有高对比度光响应。而在60%~80% RH范围内,灵敏度约为 $2.90 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \% \text{RH}^{-1}$,如图3(i)。相较于湿度对光响应的显著调控,温度对传感器发光强度的影响则相对平缓,如图3(j)所示。此外,随着驱动电场功率的增加,耦合到传感器的电磁能量不断增加,使得光功率密度也呈现出上升趋势,如图3(k)。

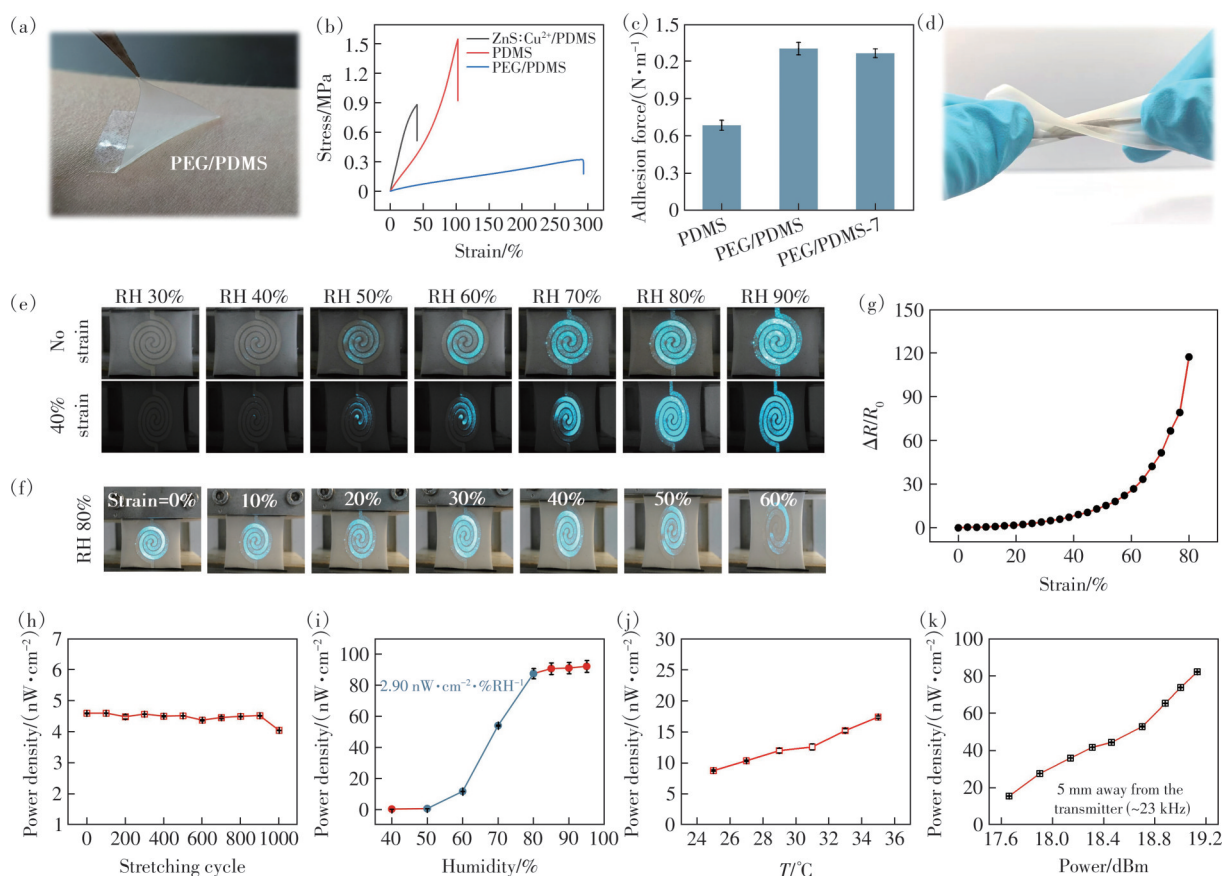


图3 湿敏可视化薄膜传感器性能。(a)皮肤黏附层的光学照片;(b)不同功能层的应力-应变曲线;(c)皮肤黏附层的黏附力变化,PEG/PDMS-7为在90% RH下放置7天后的样品;(d)湿敏可视化薄膜传感器实物图;(e)在0%和40%应变下不同相对湿度下器件的光学照片;(f)在80% RH下不同应变程度下器件的发光强度;(g)导电层在拉伸过程中的相对电阻变化;(h)器件在连续拉伸循环过程中的光功率密度变化曲线;(i)器件光功率密度随相对湿度的变化曲线;(j)器件光功率密度随温度的变化曲线;(k)在80% RH下器件光功率密度随驱动电场绝对功率的变化曲线。以上实验数据误差棒均由三次独立实验计算得出,数据以平均值 $\pm$ 标准差表示

Fig.3 Performance of the humidity-sensitive visual film sensor. (a) Optical image of the skin-adhesive layer. (b) Stress-strain curves of different functional layers. (c) Adhesion force variation of the skin-adhesive layer. PEG/PDMS-7 denotes the sample stored at 90% relative humidity for 7 days. (d) Optical images of the humidity-sensitive visualized film sensor. (e) Optical images of the sensor at 0% and 40% strain under different relative humidity levels. (f) Luminescence intensity of sensor at different strain levels under 80% RH. (g) Relative resistance change of the conductive layer during stretching. (h) Variation of the device's optical power density during cyclic stretching. (i) Power density of the device as a function of relative humidity. (j) Power density of the device as a function of temperature. (k) Power density of the device as a function of the absolute power of the driving electric field under 80% RH. All error bars were calculated from three independent experiments, and the data are presented as mean $\pm$ standard deviation

3.4 湿敏可视化薄膜传感器的非接触交互显示应用

利用人体皮肤的自然湿度^[35],湿敏可视化薄膜传感器可实现非接触可视化交互。如图4(a)、(b)所示,随着指尖靠近,发光面积和强度逐渐增大。为进一步评估传感器的显示特性,对其在不同驱动频率下的发光光谱进行了测试,结果如图4(c)所示。由于ZnS在掺杂Cu后,内部形成不同的缺陷能级^[36-37],随着电场频率升

高,光信号的波长逐渐由515 nm蓝移至447 nm。图4(d)则展现了从手指接近到停留再移开动态过程中传感器发光强度的变化。图4(e)为湿敏可视化薄膜传感器的非接触式交互实物图。除此之外,相较于手指,人体呼出的气体通常具有更高的湿度,可作为一种更加主动、便捷且易于调控的非接触式输入方式。通过图4(f)可知,调节呼吸强度、持续时间等均可改变发光行为。

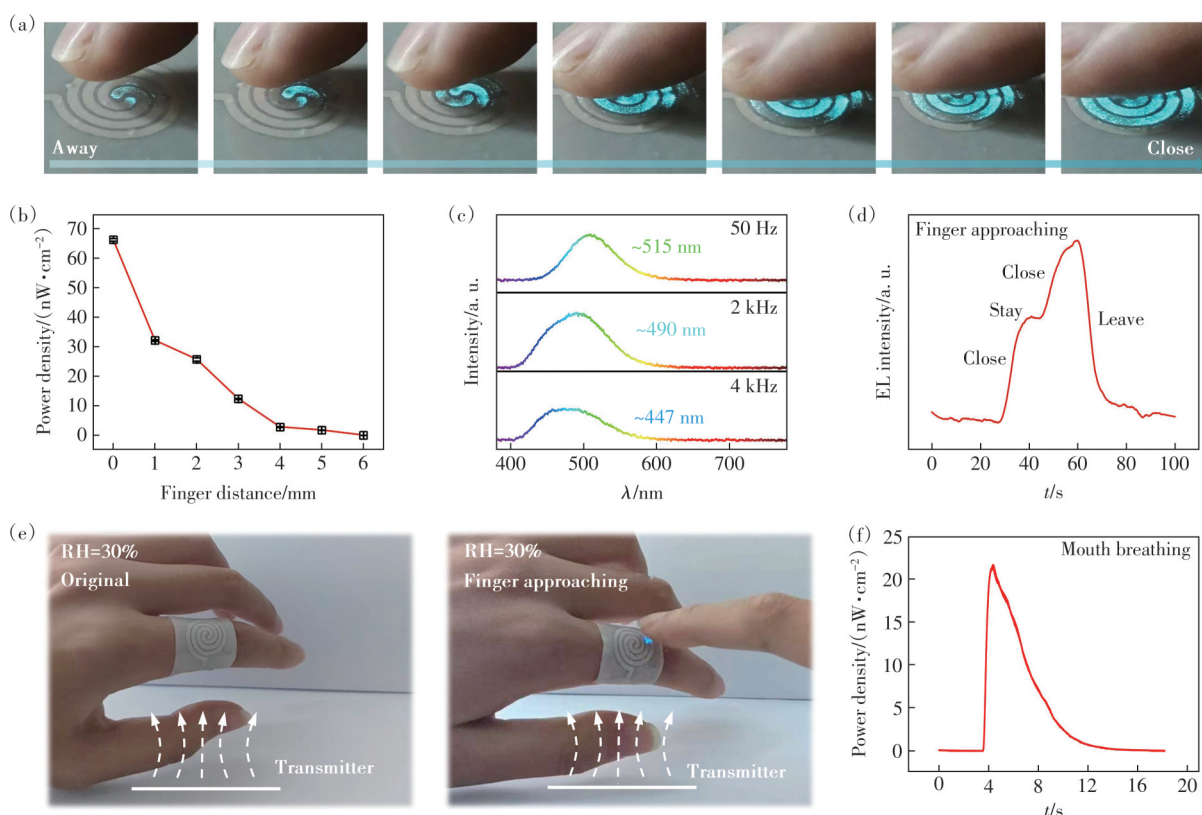


图4 湿敏可视化薄膜传感器的非接触交互应用。(a)~(b)器件对手指靠近的响应行为;(c)不同电场频率下器件的发光光谱;(d)不同手指接近行为下器件的发光强度;(e)无线非接触式交互实物图(~16 dBm, 23 kHz);(f)口呼吸下器件的发光强度

Fig.4 Contactless interactive applications of the humidity-sensitive visual film sensor. (a)–(b)Response behaviors of the sensor to the approach of a fingertip. (c)The dominant wavelength of the spectra at different driving frequencies. (d)Luminescence intensity of the sensor under different finger-approach behaviors (~16 dBm, 23 kHz). (e)Physical diagrams of wireless contactless interaction. (f)Luminescence intensity of the sensor in response to exhaled breath

4 结 论

本文设计并制备了一种基于场致发光的湿敏可视化薄膜传感器,实现了湿度感知、无线驱动与发光显示功能的一体化集成。该传感器通过将湿度传感凝胶与交流场致发光荧光粉结合,将湿度变化直接转化为光信号,并利用人体与环境间的电场耦合实现无线工作,避免了传统外接电源和显示模块带来的结构复杂问题。结果表明,该薄膜具有良好的贴肤性、柔韧性和拉伸稳定性,在不同湿度及形变条件下均表现出较稳定的发光性

能。同时,该传感器能够对手指靠近和口呼吸等非接触刺激产生实时可视化反馈,展现出在人机交互领域的应用潜力。该研究为柔性可穿戴电子及无线可视化交互器件的发展提供了新的思路,后续仍可在光响应速度、长期稳定性及非接触交互实用化方面进一步优化,以推动其在人机交互系统中的应用。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260085>

参 考 文 献:

- [1] ZHANG Z H, WANG C, WANG Q, *et al.* Cholesteric cellulose liquid crystal ink for three-dimensional structural coloration [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2022, 119(23): e2204113119.
- [2] JAISWAL A K, HOKKANEN A, KHAKALO S, *et al.* Thermochromic nanocellulose films for temperature-adaptive passive cooling [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(12): 15262-15272.

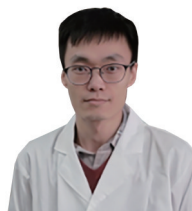
- [3] ZHENG J L, CHEN J L, GALLUZZI M, *et al.* Highly sensitive wearable chromic force sensor utilizing in-plane anisotropy in polydiacetylene mechanochromism [J]. *Nano Lett.*, 2025, 25(18): 7307-7316.
- [4] GE D T, LEE E, YANG L L, *et al.* A robust smart window: reversibly switching from high transparency to angle-independent structural color display [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(15): 2489-2495.
- [5] MIAO X, WU C X, LI F, *et al.* Fast and visual detection of biogenic amines and food freshness based on ICT-induced ratiometric fluorescent probes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(27): 2212980.
- [6] CHEN C, WANG M H, ZHU M H, *et al.* Electrochromic pressure-sensitive device for *in situ* and instantaneous pressure visualization [J]. *Nano Lett.*, 2025, 25(11): 4154-4162.
- [7] HE J Q, WEI R L, MA X L, *et al.* Contactless user-interactive sensing display for human-human and human-machine interactions [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(25): 2401931.
- [8] ZHANG P, LEI I M, CHEN G D, *et al.* Integrated 3D printing of flexible electroluminescent devices and soft robots [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 4775.
- [9] ZHANG J X, LU Q Y, WU M, *et al.* Intrinsically stretchable light-emitting drawing displays [J]. *npj Flex. Electron.*, 2024, 8(1): 1.
- [10] S-JOH, CHOI S-E, WOO I, *et al.* Stretchable multicolored electroluminescent sound display for wearable and interactive textiles [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(31): 2420432.
- [11] LEE S W, BAEK S, PARK S-W, *et al.* 3D motion tracking display enabled by magneto-interactive electroluminescence [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 6072.
- [12] HOU T T, CHEN C J, GUO R, *et al.* A bioinspired self-powered optical tactile sensing system with ultrahigh sensitivity and ultralow detection limit [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 11668.
- [13] QU C M, ZHANG Y L, CHEN Z H, *et al.* A flexible and wearable visual pressure sensing system based on piezoresistive sensors and alternating current electroluminescence devices [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2024, 9(1): 2301280.
- [14] JIN W, KIM E H, LEE S, *et al.* Tandem interactive sensing display de-convoluting dynamic pressure and temperature [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(23): 2010492.
- [15] LIU Y B, QIAO Y, SUN Z C, *et al.* Visual pressure interactive display of alternating current electroluminescent devices based on hydrogel microcapsules [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2022, 10(34): 12221-12231.
- [16] XING Z F, LI S H, ZHANG X, *et al.* Ratiometric temperature sensing through alternating current electroluminescence [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2026, 14(12): e03425.
- [17] SUN X H, ZHANG J Y, LI X, *et al.* Thermal response color-tunable electroluminescent device for real-time visual temperature monitoring [J]. *Giant*, 2024, 20: 100339.
- [18] HE Y Q, ZHANG M Y, ZHANG N, *et al.* Paper-based ZnS:Cu alternating current electroluminescent devices for current humidity sensors with high-linearity and flexibility [J]. *Sensors*, 2019, 19(21): 4607.
- [19] GUO H, WANG J L, REN D Y, *et al.* Textile-based humidity-driven wearable electroluminescent for visual sensing [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2021, 168(11): 117515.
- [20] SEEKAEW Y and WONGCHOOSUK C. A novel graphene-based electroluminescent gas sensor for carbon dioxide detection [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2019, 479: 525-531.
- [21] EN-ON J, TUANTRANONT A, KERDCHAROEN T, *et al.* Flexible alternating current electroluminescent ammonia gas sensor [J]. *RSC Adv.*, 2017, 7(27): 16885-16889.
- [22] KIM E H, HAN H, YU S, *et al.* Interactive skindisplay with epidermal stimuli electrode [J]. *Adv. Sci.*, 2019, 6(13): 1802351.
- [23] KIM J S, KIM E H, PARK C, *et al.* Sensing and memorising liquids with polarity-interactive ferroelectric sound [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 3575.
- [24] ALFREY G F and TAYLOR J B. Electroluminescence in single crystals of zinc sulphide [J]. *Proc. Phys. Soc., Sect. B*, 1955, 68(10): 775-784.
- [25] IBÁÑEZ J, GARCIA E, GIL L, *et al.* Frequency-dependent light emission and extinction of electroluminescent ZnS:Cu phosphor [J]. *Displays*, 2007, 28(3): 112-117.
- [26] YANG W F, LIN S M, GONG W, *et al.* Single body-coupled fiber enables chipless textile electronics [J]. *Science*, 2024, 384(6691): 74-81.

- [27] 杨小锐, 杨伟峰, 李克睿, 等. 单电极电致发光纤维的连续制备及其可视化液体传感应用 [J]. 发光学报, 2024, 45(7): 1049-1057.
- YANG X R, YANG W F, LI K R, *et al.* Continuous preparation of single-electrode electroluminescent fibers and their visual liquid sensing applications [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(7): 1049-1057. (in Chinese)
- [28] YANG X R, YANG W F, WANG W X, *et al.* A single-chip optoelectronic sensor integrated with the human body for tactile perception and memory [J]. *Device*, 2024, 2(11): 100600.
- [29] HAN M W, ESPINOSA-MARZAL R M. Influence of water on structure, dynamics, and electrostatics of hydrophilic and hydrophobic ionic liquids in charged and hydrophilic confinement between mica surfaces [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(36): 33465-33477.
- [30] KATO H, NISHIKAWA K, KOGA Y. Relative hydrophobicity and hydrophilicity of some “ionic liquid” anions determined by the 1-propanol probing methodology: a differential thermodynamic approach [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2008, 112(9): 2655-2660.
- [31] BAHADUR I, MOMIN M I K, KOORBANALLY N A, *et al.* Interactions of polyvinylpyrrolidone with imidazolium based ionic liquids: spectroscopic and density functional theory studies [J]. *J. Mol. Liq.*, 2016, 213: 13-16.
- [32] NIE J X, XIAO S H, TAN R, *et al.* New insights on the fast response of poly(ionic liquid)s to humidity: the effect of free-ion concentration [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(5): 749.
- [33] COSKUN O K, BAGBUDAR Z, KHOKHAR V, *et al.* Synergistic effects of the electric field induced by imidazolium rotation and hydrogen bonding in electrocatalysis of CO₂ [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2024, 146(34): 23775-23785.
- [34] HOWARD B T, IVEY H F, LEHMANN W. Voltage dependence of electroluminescent brightness [J]. *Phys. Rev.*, 1954, 96(3): 799-800.
- [35] LOGGER J G M, MÜNCHHOFF C U, OLYDAM J I, *et al.* Anatomical site variation of water content in human skin measured by the epsilon: A pilot study [J]. *Skin Res. Technol.*, 2019, 25(3): 333-338.
- [36] ALLIERI B, PERUZZI S, ANTONINI L, *et al.* Spectroscopic characterisation of alternate current electroluminescent devices based on ZnS-Cu [J]. *J. Alloys Compd.*, 2002, 341(1-2): 79-81.
- [37] BOWERS R and MELAMED N T. Luminescent centers in ZnS:Cu:Cl phosphors [J]. *Phys. Rev.*, 1955, 99(6): 1781-1787.



梁瑞霞(2001-),女,河南驻马店人,硕士研究生,2023年于河南理工大学获得学士学位,主要从事智能可穿戴材料的研究。

E-mail: lrx18790397821@163.com



侯成义(1987-),男,四川绵阳人,博士,研究员,2014年于东华大学获得博士学位,主要从事智能纤维与柔性电子材料的研究。

E-mail: hcy@dhu.edu.cn



张青红(1966-),男,安徽安庆人,博士,研究员,2000年于中国科学院上海硅酸盐研究所获得博士学位,主要从事无机纳米功能材料的基础及应用研究。

E-mail: zhangqh@dhu.edu.cn