

## 面向可穿戴手势识别的负泊松比应力发光薄膜设计及性能优化

张天成<sup>1,2</sup>, 程昊亮<sup>1</sup>, 区嘉祺<sup>1</sup>, 余嘉力<sup>1</sup>, 房双强<sup>1\*</sup>, 王 乐<sup>1\*</sup>

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018;

2. 温州职业技术学院 智能制造学院, 浙江 温州 325035)

**摘要:** 应力发光因可实现机械能-光能直接转换,在柔性感知、可穿戴器件与人机交互领域具有广阔应用前景,但传统应力发光器件普遍存在响应阈值高、动态工况下与皮肤力学耦合效率低等问题,严重制约了其对微弱力学信号的响应能力。本文针对上述瓶颈,提出一种具有负泊松比效应的应力发光薄膜结构,通过有限元仿真优化结构参数,使其泊松比变化范围与人体手指关节弯曲过程中的皮肤应变特性高度匹配,实现了器件与皮肤的动态共形贴合与高效力学耦合。实验结果表明,优化后的负泊松比薄膜应力发光响应阈值仅为0.8 N,约为传统哑铃结构薄膜的25%。在50%拉伸率下经8000次循环加载后,发光强度仍保持初始值的70%,兼具优异的灵敏度与工作稳定性。基于该薄膜构建的暗场手势识别系统,成功实现了对灵巧手的实时远程控制,识别准确率达95.5%。本研究提出的力学适配结构设计策略,为发展兼具高灵敏度、佩戴舒适性与环境适应性的柔性应力发光器件提供了新的思路与实验依据。

**关键词:** 应力发光; 负泊松比结构; 柔性传感器; 可穿戴电子; 力-光耦合

中图分类号:

文献标识码:

DOI: 10.37188/CJL.20260168

CSTR: 32170.14.CJL.20260168

## Design and Performance Optimization of Auxetic Mechanoluminescent Films for Wearable Gesture Recognition

ZHANG Tiancheng<sup>1,2</sup>, CHENG Haoliang<sup>1</sup>, OU Jiaqi<sup>1</sup>, YU Jiali<sup>1</sup>, Fang Shuangqiang<sup>1\*</sup>, WANG Le<sup>1\*</sup>

(1. College of Optics and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Intelligent Manufacturing College, Wenzhou Polytechnic, Wenzhou 325035, China)

\* Corresponding Authors, E-mail: fsq1025@163.com; calla@cjl.u.edu.cn

**Abstract:** Mechanoluminescence, which enables direct conversion of mechanical energy into light energy, holds broad application prospects in flexible sensing, wearable devices, and human-machine interaction. However, conventional mechanoluminescent devices generally suffer from high response thresholds and poor mechanical coupling efficiency with the skin under dynamic conditions, severely limiting their ability to respond to weak mechanical signals. To address these bottlenecks, this paper proposes a mechanoluminescent thin film structure with a negative Poisson's ratio (auxetic) effect. Through finite element simulation, the structural parameters are optimized such that the film's Poisson's ratio variation range closely matches the skin strain characteristics during human finger joint bending, achieving dynamic conformal adhesion and efficient mechanical coupling between the device and the skin. Experimental results demonstrate that the optimized auxetic film exhibits a mechanoluminescent response threshold as low as 0.8 N, which is approximately 25% of that of conventional dumbbell-structured films. After 8,000 cyclic loading cycles under 50% tensile strain, the luminescence intensity retains 70% of its initial value, demonstrating excellent sensitivity and operational stability. A dark-field gesture recognition system constructed using this film suc-

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(62527819;U24A20307)

National Natural Science Foundation of China(62527819;U24A20307)

cessfully enables real-time remote control of a dexterous robotic hand, achieving a recognition accuracy of 95.5%. The mechanically adaptive structural design strategy proposed in this study provides new insights and experimental evidence for the development of flexible mechanoluminescent devices featuring high sensitivity, wearing comfort, and environmental adaptability.

**Keywords:** mechanoluminescence; negative Poisson's ratio structure; flexible Sensor; wearable electronics; mechano-optical Coupling

## 1 引 言

应力发光是指材料在拉伸、压缩、扭转等机械刺激作用下,将机械能转化为光能的物理现象,无需外部供电即可实现多色发光,在智能传感领域展现出巨大的应用潜力<sup>[1-3]</sup>。随着可穿戴电子设备与智能人机交互技术的快速发展,将应力发光材料与柔性基底复合,制备能够贴附于人体皮肤或物体表面的柔性力-光传感薄膜,已成为可穿戴传感领域的研究前沿<sup>[4-14]</sup>。然而,传统力致发光材料在实际应用中通常需要施加较大的机械刺激才能实现有效激发<sup>[15]</sup>。当其制备成可穿戴弹性体器件时,发光颗粒分散复合于柔性基底之中,单位体积内有效发光单元减少,发光能力被削弱,导致器件的响应阈值进一步升高、灵敏性下降,限制了其对微弱力学信号的响应能力,不利于应力发光传感器件在可穿戴领域的应用。

针对上述问题,当前研究主要从材料性能优化与弹性体结构创新两个维度切入,提升应力发光效率。在材料优化方面,Xie<sup>[16]</sup>等人聚焦无机-有机复合体系中界面摩擦电效应对应力发光的影响机制,通过系统筛选摩擦电序列差异较大的材料组合并量化界面电荷转移行为,将复合薄膜的应力发光强度提升约20倍,为未来应力发光材料的设计提供理论支撑。我们团队通过Li<sup>+</sup>/Dy<sup>3+</sup>共掺杂策略对Sr<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup>材料进行精准的缺陷工程调控,在无需任何弹性结构优化的前提下,成功将应力发光阈值降至72 Pa(与人体脉搏振动的压力处于同量级),为微弱生理信号的响应提供了新的材料选择<sup>[17]</sup>。在结构设计方面,Chang<sup>[18]</sup>等人受生物毛发结构启发,设计制备了微纤毛阵列应力发光薄膜。该结构通过将微弱外力集中至纤毛尖端,实现了10 mN的超低激活阈值。Ma<sup>[19]</sup>等人通过在力致发光薄膜上构筑微米级凸柱阵列与纳米级蜂窝状表面纹理,实现了应力局域化与光提取效率的协同增强。相比平面薄膜,器件在521 nm

波段的发光强度提升366%。在力-光转换机理方面,我们团队对应力发光的动态响应机制开展研究,发现发光性能主要由刺激速率与刺激时间共同决定,并通过拓扑优化结构,在Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup>@聚二甲基硅氧烷(PDMS)体系中,将发光强度提升693倍、应力阈值降低78%,为高灵敏度柔性力光传感器的结构设计提供了重要指导<sup>[20]</sup>。然而,现有研究多集中于通过微结构调控应力分布以降低响应阈值、提升发光强度,却忽视了在动态使用场景下器件与皮肤之间的力学耦合对应力传递效率的影响。当器件贴附于人体皮肤时,二者弹性模量的显著差异使得薄膜在关节弯曲、手腕摆动等动态条件下难以与皮肤形成稳定、高效的力学耦合界面,导致外界机械能无法有效传递至应力发光弹性体内部,从而制约了发光效率的提升和应用稳定性。

为此,本文提出一种具有负泊松比效应的薄膜结构设计方案。该结构利用负泊松比材料在轴向拉伸时产生横向膨胀特性,能够在动态场景下与使用者皮肤产生紧密的机械互锁效应,显著增强薄膜与皮肤之间的共形贴合能力,提高力学耦合效率。同时,该结构在外力作用下能够将载荷有效集中至特定区域,使得薄膜承受的局部应力显著增大,进一步降低传感器的驱动阈值。为实现兼具高灵敏度、良好佩戴舒适性及长期工作稳定性的柔性应力发光器件提供了新的思路与理论依据。

## 2 实 验

### 2.1 样品制备

本研究首先采用光固化3D打印技术制备模具,为方便脱模,打印完成后将模具浸入全氟辛基三氯硅烷@乙醇水溶液中浸泡10秒,随后转移至干燥箱中,在75 °C下干燥15分钟以去除表面残留。将ZnS:Cu<sup>2+</sup>荧光粉、PDMS分别按一定的质量比进行混合,加入固化剂(其用量为PDMS质量的10%)充分搅拌后将混合料液缓慢转移至预先制

备的树脂模具中。为去除搅拌过程中产生的气泡,将装有样品的模具置于真空消泡桶中抽真空处理 15 分钟。脱气完成后转移至干燥箱中,于 75 °C 条件下固化 2 小时,使 PDMS 交联成型。

## 2.2 样品表征

采用 X 射线衍射仪 (XRD, D8/Advance) 对 ZnS:Cu<sup>2+</sup> 粉末的晶体结构进行表征,扫描范围为 20 °~70 °,扫描速率为 10 °/min。采用 X 射线光电子能谱仪 (XPS, ESCALAB 250Xi) 分析 ZnS:Cu<sup>2+</sup> 粉

末中 Cu 的价态。采用扫描电子显微镜 (SEM, Sigma 300) 观察薄膜的表面形貌。采用实验室自主搭建的力-光同步测试平台对薄膜的拉伸性能及其应力发光响应特性进行分析。如图 1a 所示,薄膜两端经平口夹固定于直线导轨,力传感器则安装于夹具一侧。测试开始后,力传感模块实时记录薄膜在拉伸过程中的受力变化,同时利用 QE pro 光纤光谱仪对该过程中薄膜释放的光信号进行同步采集与解析。

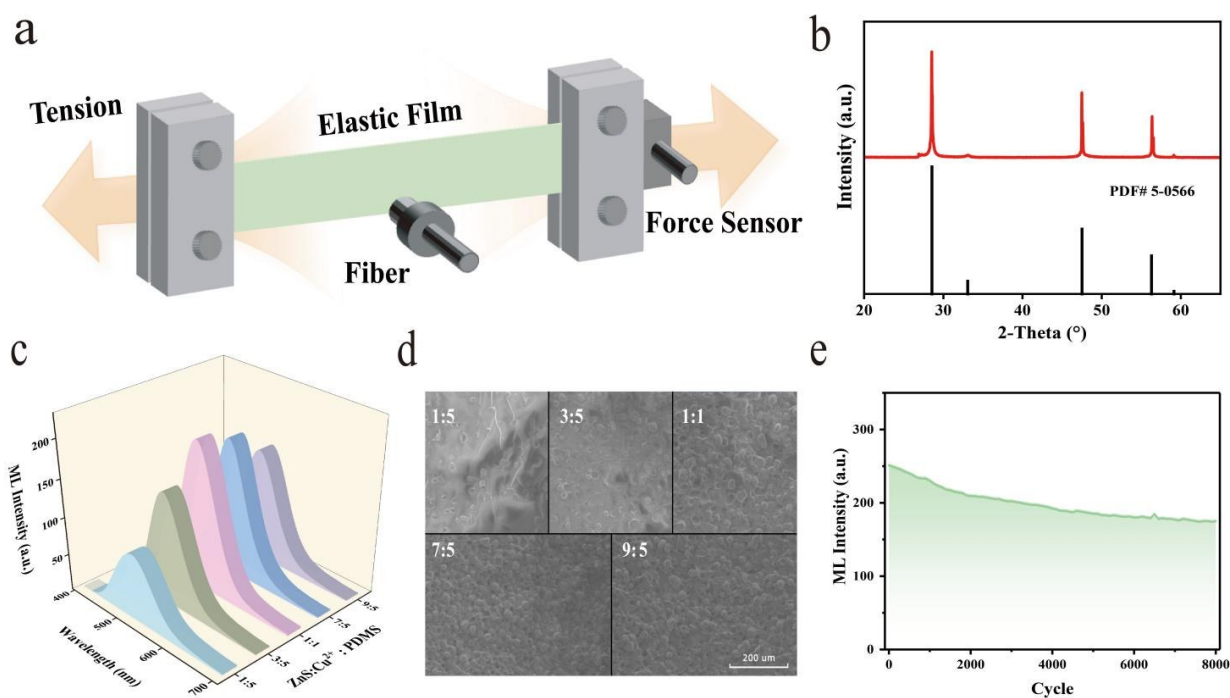


图 1 (a) 拉伸实验设备原理图; (b) ZnS:Cu<sup>2+</sup> 粉末 XRD 图; (c) 不同粉胶比 (ZnS:Cu<sup>2+</sup>:PDMS) 制备的薄膜应力发光的发光光谱图; (d) 不同粉胶比 (ZnS:Cu<sup>2+</sup>:PDMS) 制备的弹性薄膜 SEM 图; (e) 薄膜 8000 次重复拉伸过程中发光强度与拉伸次数的变化关系

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the tensile testing experimental setup; (b) XRD pattern of ZnS:Cu<sup>2+</sup> powder; (c) Mechanoluminescence spectra of elastic films prepared with different powder-to-matrix ratios (ZnS:Cu<sup>2+</sup>:PDMS); (d) SEM images of elastic films prepared with different powder-to-matrix ratios (ZnS:Cu<sup>2+</sup>:PDMS); (e) Relationship between luminescence intensity and the number of tensile cycles during 8,000 repeated stretching cycles of the film.

## 3 结果与讨论

### 3.1 粉胶比对薄膜发光性能的影响

为了验证实验所用发光填料 (ZnS:Cu<sup>2+</sup> 粉末) 的晶体结构与物相纯度,对其进行了 X 射线衍射分析。结果如图 1b 所示,ZnS:Cu<sup>2+</sup> 粉末的衍射峰形尖锐,半高宽较窄,表明所采用的 ZnS:Cu<sup>2+</sup> 粉末具有优良的结晶性。经对比,ZnS:Cu<sup>2+</sup> 粉末的 X 射线衍射图谱能够与标准卡片上的衍射峰完全吻合,说明 Cu<sup>2+</sup> 的掺杂没有对 ZnS 晶体的晶体结构产生明显影响。XPS 测试结果如补充材料图 S1

所示,Cu<sub>2p</sub> 谱中出现了 Cu<sub>2p3/2</sub> 和 Cu<sub>2p1/2</sub> 主峰,并在高结合能区域观察到明显的 Cu<sup>2+</sup> 卫星峰,说明样品中 Cu<sup>2+</sup> 为主要成分。

将 ZnS:Cu<sup>2+</sup> 荧光粉和 PDMS 分别按照 1:5、3:5、1:1、7:5 及 9:5 的质量比制备了 5 组不同粉胶比的哑铃结构薄膜,利用实验室自主搭建的力-光同步测试平台,测试各组薄膜在 40% 拉伸率下的发光光谱,结果如图 1c 所示,ZnS:Cu<sup>2+</sup>@PDMS 的发射光谱呈现出一个宽峰发射,峰值位于 450 nm-650 nm 之间。发射峰最大值在 521 nm 处。随着 ZnS:

Cu<sup>2+</sup>比例的增加,发光强度呈现先升高后降低的趋势,这说明薄膜的应力发光性能对填料含量具有依赖性,当 ZnS:Cu<sup>2+</sup>与 PDMS 的质量比为 1:1 时,薄膜表现出最优的发光性能。这是因为当 ZnS:Cu<sup>2+</sup>含量较低时(如 1:5 和 3:5),虽然填料在 PDMS 基体中分散性较好(如图 1d 所示,样品表面较为平整),但单位体积内的发光中心数量不足,颗粒间难以形成有效的应力传递网络。在拉伸应力作用下,参与压电电子-空穴对激发与复合的发光点较少,导致宏观发光强度偏低。随着 ZnS:Cu<sup>2+</sup>比例增加至 1:1,填料在基体中的分布密度提高,复合薄膜内部形成了更为完善的应力传导网络。适量的填料既能保证充足的发光中心密度,又可使 PDMS 基体在保持弹性连续性的同时,将外部拉伸应力有效传递至 ZnS:Cu<sup>2+</sup>颗粒,从而激发更强的应力发光信号。粉胶比的选择不仅决定薄膜的发光强度,也会影响其后续结构成型和拉伸变形稳定性。复合基体需要同时具备足够的发光颗粒密度、有效的应力传递能力和良好的弹性连续性。当填料比例过高(如 7:5 和 9:5),颗粒密度过大,在 SEM 图像(图 1d)中可观察到明显团聚。这些团聚体会在复合薄膜内部形成局部应力集中点,导致局部微裂纹过早萌生,削弱 PDMS 基体的连续性,使应力无法均匀传递,并可能影响后续结构单元在拉伸过程中的协同变形。因此,过高填料含量反而不利于应力发光增强和结构稳定。

基于上述发光性能、颗粒分散状态、应力传递能力和基体连续性的综合考虑,本文最终将 ZnS:Cu<sup>2+</sup>荧光粉与 PDMS 的质量比确定为 1:1。为进一步检测该配比复合薄膜的循环可靠性,我们以 40% 的应变对其进行了 8000 次循环拉伸实验,每次拉伸间隔 1 s,并实时采集拉伸过程中的发光强度,结果如图 1e 所示。应力发光强度随着拉伸次数增加逐渐下降,随后趋于稳定;当 8000 个拉伸周期结束时,薄膜发光亮度仍然清晰可见,约为初始亮度的 75%,说明该粉胶比制备的复合薄膜在保持较高发光强度的同时,也具备良好的循环拉伸可靠性,可作为后续负泊松比结构薄膜构筑的材料基础。

### 3.2 负泊松比薄膜的结构参数分析

本研究从穿戴适应性与响应灵敏性两个角度出发,对负泊松比薄膜的结构参数进行优化,旨在获得与人类手指关节皮肤力学性能最匹配且应力

阈值最低的薄膜结构。本研究设计的负泊松比薄膜属于周期性切缝旋转单元结构,其几何模型如图 2a 所示:其中 a 为单元长度,b 为狭缝宽度,c 为连接韧带宽度,薄膜厚度为 2mm。为确定最优结构参数,本研究设计了纵横比 AC(a/c)和狭缝比 AB(a/b)分别为 4、6、8 的 9 种不同几何构型薄膜,具体尺寸参数见补充表 S1。利用 Abaqus 有限元软件模拟各模型在 0% - 60% 单轴拉伸过程中的力学行为。由于横向应变分布不均,在薄膜单侧均匀选取 4 个点,根据公式(1)计算各模型在不同拉伸率下的泊松比<sup>[21]</sup>。

$$PR_i = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{1}{4} \cdot \frac{\sum_{j=1}^4 (y_{ij} - y_{0j})}{x_i - x_0} \quad (1)$$

其中 PR<sub>i</sub> 为拉伸变量为 i% 时薄膜的泊松比,ε<sub>x</sub> 和 ε<sub>y</sub> 分别为轴向和横向应变。在 0% 至 60% 的单轴拉伸范围内,9 种结构的泊松比变化如图 2b 所示:随着狭缝比 AB 的增大,各模型的泊松比 PR 均呈现逐渐减小的趋势。这是因为狭缝比会影响旋转单元之间铰接部位的宽度,狭缝比越高意味着铰链连接处越窄,在拉伸过程中结构更接近理想点铰链的旋转行为,从而有效降低了旋转约束,增强结构的横向膨胀能力。在 9 种模型中,狭缝比 AB 为 4 的三组薄膜(纵横比分别为 4、6 和 8)泊松比变化范围分别为 -0.31 ~ 0.16、-0.42 ~ 0.13、-0.49 ~ 0.05。与手指关节弯曲过程中皮肤的泊松比变化范围(-0.41 ~ 0.11)最为接近<sup>[22]</sup>,说明这三种结构都具有较好的形变匹配能力,适用于柔性穿戴式应力发光器件。

在此基础上,为进一步筛选具有最低应力响应阈值的薄膜结构,采用 Abaqus 对上述三组薄膜进行应力-应变关系分析,比较其在相同拉伸条件下的应力大小。结果如图 2c 所示,纵横比 AC 为 4、狭缝比 AB 为 4 的薄膜在拉伸过程中产生的应力值最小,当达到 60% 时,所需的应力大小仅为 0.29 N。这是由于纵横比降低使得薄膜的孔隙率增大,从而减少单位面积内承担载荷的实体材料占比。在施加相同宏观应变的情况下,由于实体材料的减少,整体结构抵抗变形的有效截面积下降,在外力作用下更易产生应力集中,从而具备更低的应力响应阈值。继续降低纵横比虽然可以进一步提高薄膜的灵敏度,但是孔隙率过高不仅会影响结构的功能稳定性而且不利于观察应力发光效果。因此,本研究以纵横比 AC=4、狭缝比 AB=

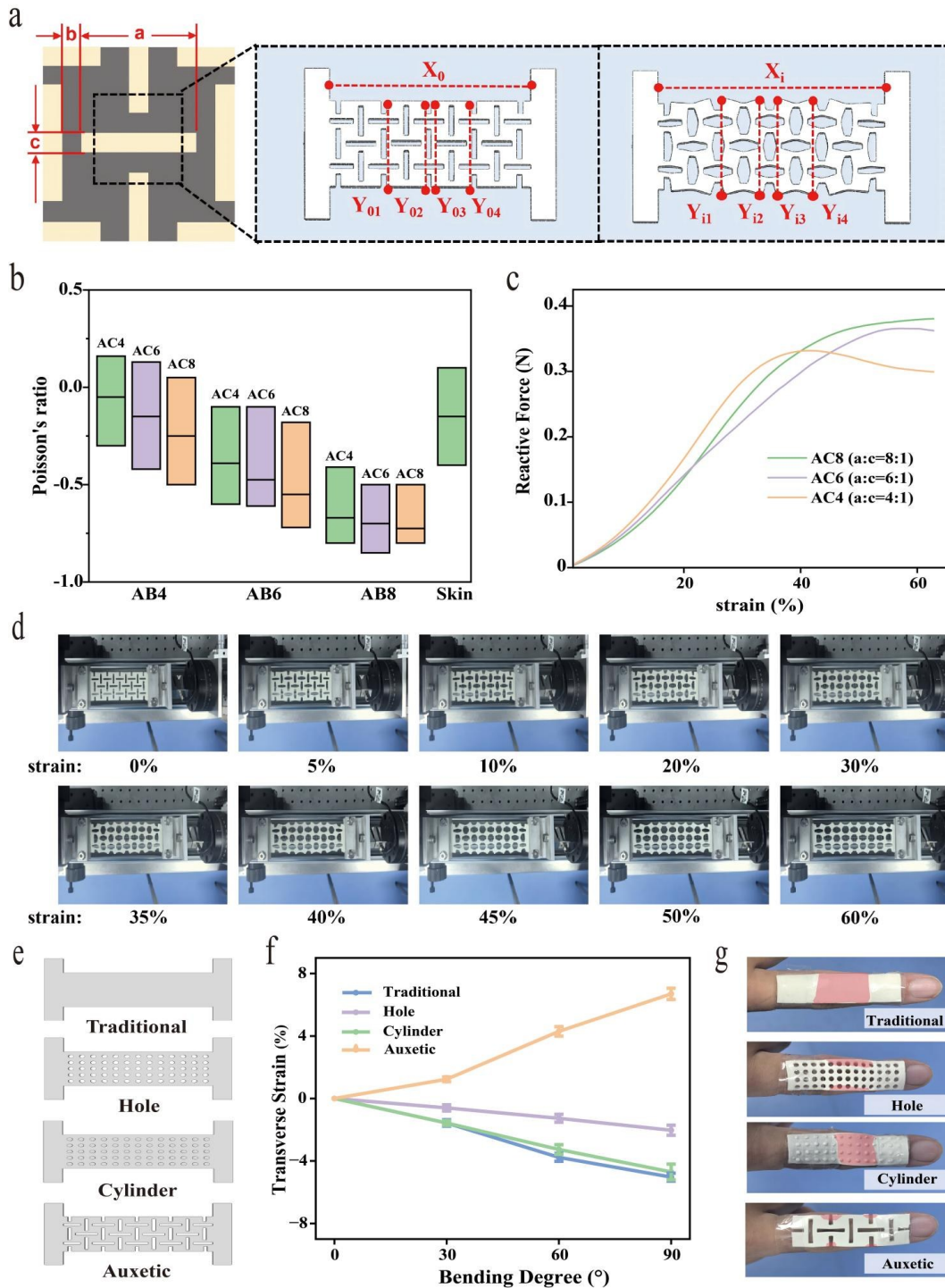


图2 (a)泊松比计算原理图; (b)不同带宽比AB (a:b)及不同纵横比AC (a:c)下薄膜从0%拉伸至60%的泊松比变化范围; (c)带宽比为1:4下不同纵横比的薄膜拉伸过程中应变与反作用力的变化关系; (d)负泊松比薄膜拉伸实验图; (e)普通、孔阵列、圆柱阵列、负泊松比薄膜示意图; (f)四种薄膜在手指弯曲过程种的横向应变; (g)四种薄膜在手指50次弯曲后的脱粘情况

Fig. 2 (a) Schematic diagram of the Poisson's ratio calculation principle; (b) Variation range of Poisson's ratio of the film stretched from 0% to 60% under different bandwidth ratios AB (a:b) and different aspect ratios AC (a:c); (c) Relationship between strain and reaction force during stretching of films with different aspect ratios at a bandwidth ratio of 1:4; (d) Photograph of the tensile testing experiment of the auxetic film; (e) Schematic diagrams of traditional, hole array, cylindrical array, and negative Poisson's ratio films; (f) Lateral strain of the four films during finger bending; (g) Delamination status of the four films after 50 cycles of finger bending.

4 的参数组合制备了负泊松比薄膜,并进一步通过实际拉伸实验对有限元模型的预测结果进行验证。如补充图 S2 所示,在 0%-60% 拉伸范围内,每隔 10% 拉伸应变记录一次薄膜的实际拉伸反作用力,并与有限元仿真结果进行对比。结果表明,实验测得的反作用力随应变增加呈现先升高后趋于水平并略有下降的非线性变化趋势,与仿真曲线整体一致,说明有限元模型能够较好地预测最优负泊松比结构在拉伸过程中的力学响应趋势,证明该结构不仅与手指皮肤弯曲过程中的力学变形特征相匹配,同时具备较低的拉伸反作用力和良好的结构变形能力,适用于高灵敏度可穿戴应力发光传感。

### 3.3 负泊松比薄膜贴附性能分析

为进一步验证负泊松比结构在手指关节动态佩戴场景中的贴附优势,本文制备了图 2e 所示的四种具有相同材料组成和相近整体尺寸的传统平面薄膜、微孔阵列薄膜、微圆柱阵列薄膜和负泊松比薄膜。由于实际佩戴过程中薄膜通常固定于关节两侧,其界面稳定性表现为关节弯曲过程中的横向形变匹配、局部起皱/脱粘以及应力传递稳定性。因此,本文从横向应变、循环弯曲后的脱粘面积和关节曲面作用下的力学仿真三个方面,对不同结构薄膜的动态贴附行为进行比较。

首先,通过图像标记点追踪法测量不同结构薄膜在手指关节弯曲过程中的横向应变变化。在手指弯曲角度为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  时,分别拍摄薄膜形变图像,并利用 Fiji 软件测量薄膜中间自由变形区域的横向宽度,通过公式(2)计算薄膜的横向应变。

$$\varepsilon_y = \frac{w_\theta - w_0}{w_0} \times 100\% \quad (2)$$

其中,  $w_0$  为手指未弯曲时薄膜中间区域的初始横向宽度,  $w_\theta$  为手指弯曲角度为  $\theta$  时对应的横向宽度。如图 2f 所示,传统平面薄膜、微孔阵列薄膜和微圆柱阵列薄膜在弯曲过程中均表现出不同程度的横向收缩,其中传统平面薄膜和微圆柱阵列薄膜在  $90^\circ$  弯曲时横向应变约为 -5%,微孔阵列薄膜的横向收缩相对较小约为 -1.8%。相比之下,负泊松比薄膜在弯曲过程中呈现持续的横向膨胀,其横向应变随弯曲角度增加而逐渐升高,并在  $90^\circ$  弯曲时达到 6%。说明该结构在关节弯曲过程中具有与皮肤多方向扩展行为更一致的横向变形模式,能够有效降低薄膜与皮肤之间的横向形变

失配。

为评价不同薄膜在循环弯曲后的动态贴附稳定性,本文比较了四种薄膜在手指弯曲 50 次后的脱粘区域分布,如图 2g 所示。红色区域表示弯曲循环后薄膜与皮肤之间出现明显脱粘或贴附不稳定的区域。结果显示,传统平面薄膜在中间弯曲区域出现较大面积连续脱粘,这是由于其在轴向拉伸时发生横向收缩,导致薄膜与皮肤之间产生明显形变失配。微孔阵列薄膜和微圆柱阵列薄膜虽然引入了微结构,能够在一定程度上缓解整体变形约束,但其宏观横向变形仍主要表现为收缩或变形受限,因此在弯曲区域仍可观察到明显脱粘区域。相比之下,负泊松比薄膜在循环弯曲后仅出现少量局部脱粘区域,整体贴附状态更稳定。这表明负泊松比结构的横向膨胀行为能够更好地适应关节弯曲过程中皮肤表面的动态变形,从而提高薄膜在关节处的共形贴附能力。

为进一步分析上述贴附差异的力学来源,本文建立了手指关节弯曲过程的简化有限元模型。如补充图 S3 所示,将薄膜两端固定,并采用刚体球从薄膜下方顶起薄膜,以模拟手指关节弯曲过程中关节曲面对薄膜产生的顶升和拉伸作用。在相同边界条件和顶升位移下,传统平面薄膜在球体接触区域产生较大范围的连续高应变区,说明其变形主要集中在关节顶起区域,从而更容易引发局部拉伸过大和界面脱粘。微孔阵列薄膜和微圆柱阵列薄膜在孔边缘或微结构周围形成一定程度的局部应力集中,但整体仍表现出正泊松比结构的横向收缩趋势,难以从根本上缓解横向形变失配。相比之下负泊松比薄膜可通过结构单元旋转和连接韧带变形协同吸收外加曲面形变,使应变主要集中分布于旋转单元之间的连接区域,而避免在薄膜中央形成大面积连续高应变区。因此,该结构能够在关节弯曲过程中通过几何变形分散并调控局部应变分布,降低高应变区域面积,从而提高薄膜对手指关节曲面的动态适配能力。

### 3.4 负泊松比薄膜拉伸性能分析

ZnS:Cu<sup>2+</sup>@PDMS 复合薄膜的应力发光过程可理解为材料本征力-光转换与结构力学放大的耦合结果。对于 ZnS 发光颗粒而言,机械刺激可在 ZnS 晶体内部诱导局部压电势或局部电场,促进陷阱能级中载流子的释放;释放后的载流子进一步迁移,并在 Cu 相关发光中心发生辐射复合,从

而产生可见光发射。同时,在 $\text{ZnS:Cu}^{2+}$ @PDMS复合体系中,发光颗粒与PDMS弹性体基体之间的界面摩擦电效应也可能参与机械能到电激发能的转换过程。本文所设计的负泊松比结构并不改变ZnS的发光中心和陷阱能级分布,而是通过几何变形调控宏观外力在薄膜内部的传递路径,提高旋转单元连接韧带区域的局部真实应力,从而更有效地触发上述本征应力发光过程。

为进一步探究负泊松比薄膜的力致发光特性,本研究借助Abaqus有限元软件对薄膜拉伸过程中的应力分布进行分析,结果如图3a所示。在拉伸过程中,负泊松比薄膜展现出独特的应力发光特性。与传统哑铃状薄膜不同,负泊松比薄膜的发光位置主要集中于旋转单元之间的连接点处。当薄膜处于拉伸状态时,发光图案呈短线状分布;当薄膜释放回弹时,发光图案则转变为半弧状。该变化规律与拉伸仿真中薄膜的动态应力分布具有较好对应关系,说明该结构能够在拉伸过程中将宏观载荷集中传递至特定连接区域,从而更易触发 $\text{ZnS:Cu}^{2+}$ @PDMS复合体系的应力发光响应。

为进一步探究上述规律的内在机制,本研究结合仿真结果对负泊松比薄膜的变形过程进行分析。如图3b所示,当拉伸率为15%时,薄膜内部尚未出现明显的应力集中区域;而当拉伸率超过30%后,旋转单元之间的连接点处开始出现显著的局部高应力区。据此可将负泊松比薄膜的拉伸过程划分为两个阶段。第一阶段为拉伸率低于30%时,薄膜的变形主要由结构中的旋转单元围绕连接点发生转动来容纳,薄膜整体表现出较低刚度和横向膨胀行为。在该阶段,结构主要通过单元旋转而非材料自身拉伸吸收外加形变,因此连接点处的局部真实应力和相应局部电激发强度尚未达到有效触发载流子去俘获与辐射复合的水平,薄膜难以产生明显的应力发光。第二阶段为拉伸率超过30%后,旋转单元逐渐接近几何展开极限,横向膨胀能力趋于饱和,薄膜的进一步变形转而由连接韧带区域的材料拉伸应变主导。此时应力在连接韧带区域显著提高,增强的局部机械刺激进一步诱导 $\text{ZnS:Cu}^{2+}$ 颗粒内部局部电场或颗粒/PDMS界面电场增强,从而促进陷阱载流子释放、迁移并在Cu相关发光中心复合,最终产生可观测的应力发光信号。实验中观察到的发光区域

主要集中于旋转单元连接点处,表明负泊松比结构降低宏观响应阈值的主要原因并非改变材料本征力-光转换路径,而是通过结构应力放大提高局部真实应力和局部电激发强度。

图3c与图3d分别展示了负泊松比薄膜与哑铃结构薄膜在拉伸过程中的力、光信号变化。从应力角度分析(图3c),负泊松比薄膜在应力为0.8 N时即可观察到清晰的光信号,而哑铃结构薄膜则需在应力达到3.2 N时才能产生同等强度的光信号,表明负泊松比结构具有更低的应力发光阈值。然而从形变量角度分析(图3d),结果呈现相反趋势:哑铃结构薄膜在拉伸率仅为10%时即可产生光信号,而负泊松比薄膜需拉伸至35%时才能检测到光信号。这一现象说明负泊松比薄膜的结构刚度更低,在相同外力作用下更易发生形变。综上所述,负泊松比薄膜在拉伸前期通过连接点结构旋转展现出横向膨胀特性,其横向应变行为与手指关节弯曲时皮肤表面的多方向扩展趋势相匹配,有助于降低皮肤-薄膜界面的形变失配,减少起皱和脱粘,从而提高关节处的动态贴附稳定性。同时,该结构能够将宏观拉伸变形集中传递至旋转单元连接韧带区域,显著提高局部真实应力,更有效地触发 $\text{ZnS:Cu}^{2+}$ @PDMS复合体系的应力发光过程,从而降低发光阈值。该特性使负泊松比薄膜同时具备良好的关节贴附性和高效的力学信号放大能力。

### 3.5 负泊松比薄膜循环稳定性与环境可靠性分析

基于上述变形机制,本研究进一步对负泊松比薄膜的循环稳定性进行测试,以确定其实际的工作拉伸范围和环境可靠性。图3e展示了在拉伸率为60%、频率为1 Hz的条件下,薄膜的发光强度随拉伸次数的变化关系。结果表明,随着拉伸次数增加,薄膜的发光强度逐渐下降,并在第830次拉伸时发生断裂。通过观察断裂瞬间的图像可知,断裂发生于其中一个旋转单元之间的连接点处。断裂截面的SEM图像如补充图S4所示:断裂区域呈现出较为粗糙的断面形貌,并再断裂面观察到界面间隙、微孔洞以及颗粒拔出痕迹,说明在高应变循环加载过程中, $\text{ZnS:Cu}^{2+}$ 颗粒与PDMS基体之间发生了明显的界面脱粘和疲劳损伤。同时,断裂面中PDMS基体也表现出局部撕裂和裂纹扩展特征,表明高拉伸率下连接韧带区域的

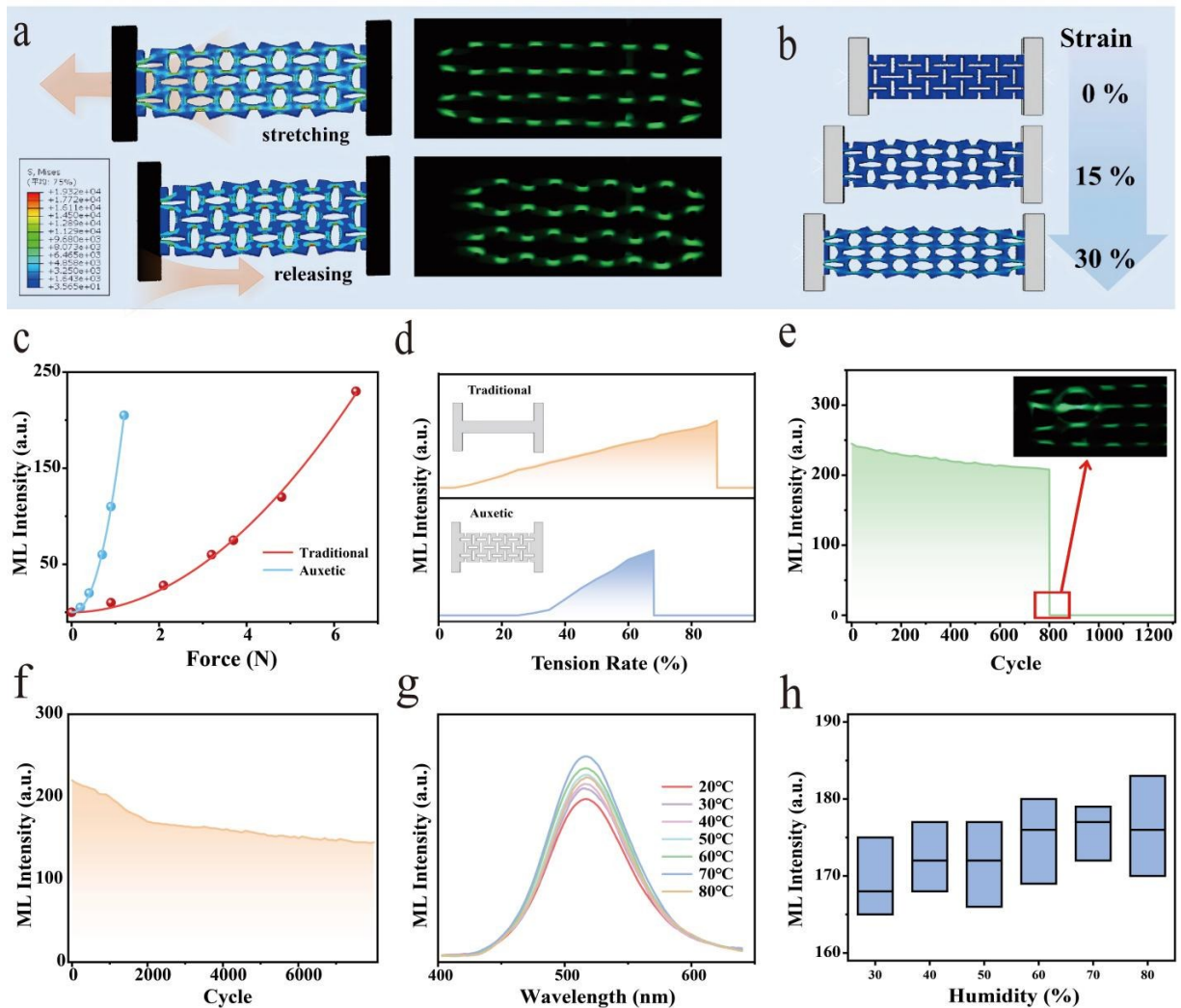


图3 (a)负泊松比薄膜拉伸过程应力分布及发光效果图;(b)不同拉伸率下薄膜的应力分布;(c)负泊松比薄膜与哑铃结构薄膜拉伸应力与发光强度变化关系;(d)负泊松比薄膜与哑铃结构薄膜拉伸率与发光强度变化关系;(e)负泊松比薄膜在60%应变下循环拉伸测试;(f)负泊松比薄膜在50%应变下循环拉伸测试;(g)负泊松比薄膜在不同温度下的拉伸光谱;(h)负泊松比薄膜在不同湿度下发光强度的变化范围

Fig. 3 (a) Stress distribution and luminescence effect diagram of the auxetic thin film during stretching; (b) Stress distribution of the film under different tensile strains; (c) Relationship between tensile stress and luminescence intensity for the auxetic thin film and the dumbbell-structured thin film; (d) Relationship between tensile strain and luminescence intensity for the auxetic thin film and the dumbbell-structured thin film; (e) Cyclic tensile test of the auxetic thin film under 60% strain; (f) Cyclic tensile test of the auxetic thin film under 50% strain; (g) Tensile spectra of the auxetic thin film at different temperatures; (h) Variation range of luminescence intensity of the auxetic thin film under different humidity levels.

局部应力集中会促进基体微裂纹的萌生与扩展。考虑到制备过程中难以保证薄膜的完全均匀性,局部存在的微观瑕疵会进一步加剧关键节点在高拉伸率循环加载下的损伤累积,最终导致薄膜失效。基于上述结果,本研究将拉伸率降低至50%,以评估薄膜在较低应变水平下的循环稳定性。结果如图3f所示,在此拉伸率下薄膜表现出优异的耐久性能:经过8000次重复拉伸后,薄膜仍能维

持明显的发光信号,其发光强度约为初始值的70%,且未发生结构破坏。综合以上测试结果,将负泊松比薄膜的稳定工作拉伸范围确定为35% - 50%。

为进一步探究负泊松比薄膜在不同环境条件下的可靠性,本研究分别在不同温度与湿度条件下对其进行了稳定性测试。图3g展示了负泊松比薄膜在20℃至80℃温度范围内、以50%拉伸率

进行拉伸时产生的发光光谱。结果表明,随着温度升高,薄膜的应力发光强度呈现先增大后减小的趋势,并在 70 °C 时达到最大值。为进一步阐明温度对应力发光强度的影响机制,本文测试了 ZnS:Cu<sup>2+</sup> 颗粒的热释光曲线。如图 S5 所示, ZnS:Cu<sup>2+</sup> 颗粒在约 300-370 K 范围内表现出明显的热释光信号,说明材料内部存在可被热激活的浅陷阱能级。结合温度依赖应力发光结果可以看出,当温度由室温升高至 70 °C 时,热能有助于促进浅陷阱中载流子的释放和迁移,使机械刺激诱导的局部压电势或界面电场更容易触发载流子去俘获,并在 Cu 相关发光中心发生辐射复合,因此薄膜的应力发光强度逐渐增强。当温度继续升高时,浅陷阱中的可释放载流子逐渐减少,同时非辐射弛豫和热猝灭过程增强。因此,薄膜在不同温度下表现出的先增强后减弱现象。图 3h 展示了负泊松比薄膜在 30% 至 80% 相对湿度条件下、以 50% 拉伸率拉伸 200 次的发光强度变化范围。实

验结果表明,随着湿度增加,薄膜的发光强度始终保持稳定,未出现明显衰减,说明该结构对潮湿环境具有良好的适应性。为评价薄膜在复杂环境下的动态服役可靠性,本文补充测试了负泊松比薄膜在 70 °C 高温环境和 80% 相对湿度环境下的循环拉伸稳定性。测试过程中,薄膜拉伸率设定为 50%,拉伸频率为 1 Hz,并连续循环拉伸 8000 次。结果如补充图 S6 和 S7 所示,在上述高温和高湿条件下,薄膜在长期循环拉伸过程中均能够保持稳定可见的应力发光信号,未出现明显发光中断或结构失效现象,说明该结构能够应用于复杂多变的实际工作场景。

### 3.6 负泊松比薄膜的应用

由于手指关节在弯曲过程中的皮肤拉伸率约为 25% - 45%,与负泊松比薄膜的应力发光工作区间(35% - 50%)存在较大重合,因此该结构适用于手指关节处的动态形变感知。基于此,本文构建了如图 4a 所示的基于负泊松比应力发光薄

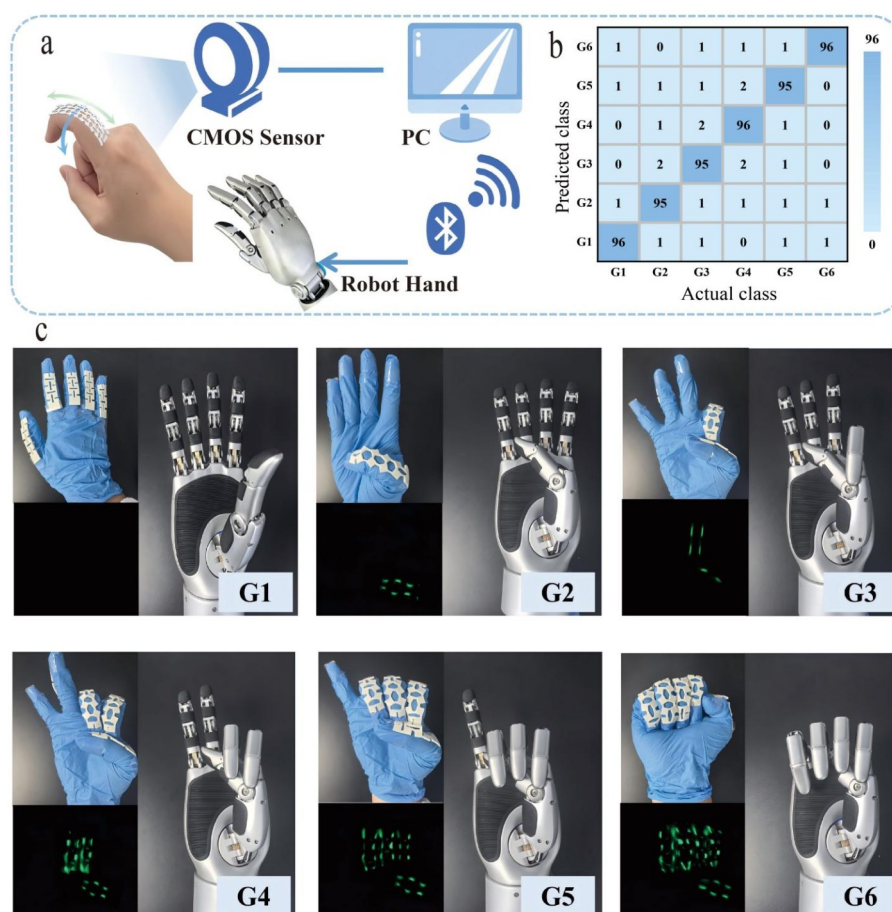


图 4 (a) 基于 CMOS 相机的暗场手势识别技术路线; (b) 六种手势识别混淆矩阵; (c) 暗场环境下手势控制灵巧手  
Fig. 4 (a) Technical route of dark-field gesture recognition based on CMOS camera; (b) Six gesture recognition confusion matrices; (c) Gesture control of a dexterous robotic hand in a dark-field environment.

膜的暗场手势识别系统,并将其作为可穿戴视觉人机交互的概念验证。该系统由负泊松比应力发光薄膜、CMOS相机、图像识别模块、蓝牙通信模块和灵巧手执行端组成。实验中,将5片裁剪后的负泊松比薄膜分别固定于右手拇指、食指、中指、无名指和小指关节处。当手指发生弯曲时,关节运动拉伸对应位置的负泊松比薄膜,使薄膜连接韧带区域产生局部应力集中并发出可见应力发光信号。对于不同组合手势,被拉伸并发光的薄膜数量、位置和强度分布存在明显差异,因此暗场图像中形成具有类别特征的空间发光图案,可作为手势识别的视觉输入。

图像采集过程中,CMOS相机在暗场环境下实时记录手部发光图像,并将图像传输至电脑端进行识别处理。为提高识别稳定性,采集图像首先经过灰度化、背景扣除、感兴趣区域裁剪和归一化处理,以减少暗场背景噪声、亮度波动以及手部位置轻微偏移对识别结果的影响。随后,将预处理后的发光图像输入基于卷积神经网络(CNN)的深度学习分类模型。该模型通过卷积层提取不同组合手势状态下发光薄膜的空间分布、发光区域数量和亮度特征,并通过全连接层和Softmax输出手势类别。本文将手势识别任务定义为六分类问题(图4c):无明显手指弯曲(G1)、拇指弯曲(G2)、拇指和食指弯曲(G3)、拇指、食指和中指弯曲(G4)、拇指、食指、中指和无名指弯曲(G5)以及握拳(G6)。识别结果通过蓝牙模块发送至灵巧手

控制端,从而实现人体手势到机械手动作的实时映射,具体控制过程请参见补充材料视频1。

为评估系统识别性能,本文对六种手势的暗场发光图像进行采集并构建数据集,按照训练集和测试集进行划分后训练CNN分类模型。测试结果如图4b所示,系统整体识别准确率达到95.5%。从混淆矩阵可以看出,各类手势识别结果主要集中于对角线位置,说明CNN模型能够有效区分不同组合手势对应的空间发光模式,证明该器件在暗场可穿戴手势识别和远程人机交互中具有应用潜力。

## 4 结 论

针对传统应力发光薄膜响应阈值高、动态使用场景下力学耦合效率不足的问题,本文基于有限元仿真与实验验证,设计了一种与手指皮肤力学性能高度匹配的负泊松比应力发光薄膜。该薄膜凭借其独特的负泊松比效应,能够在关节弯曲过程中通过几何变形实现曲面适配,同时将局部应力集中于结构连接韧带区域,从而兼顾动态共形贴附和力学信号放大。其稳定工作拉伸范围为35%-50%,与手指关节弯曲时皮肤的实际应变区间(25%-45%)高度吻合。此外,该薄膜兼具优异的灵敏度与稳定性,能够适应高温、潮湿等复杂多变的工作环境。本文提出的基于负泊松比结构的力学适配策略,为突破传统应力发光器件在动态使用场景下的性能瓶颈提供了有效途径。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] RNDEIRO R, JARGUS J, NEDOMA J, *et al.* The possibilities of using a mixture of PDMS and phosphor in a wide range of industry applications [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2024, 7: 240133.
- [ 2 ] GUO L C, XIA P, WANG T, *et al.* Visual representation of the stress distribution with a color-manipulated mechanoluminescence of fluoride for structural mechanics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33: 2306875.
- [ 3 ] LIU H, ZHENG Y, LIU S, *et al.* Realizing red mechanoluminescence of ZnS: Mn<sup>2+</sup> through ferromagnetic coupling [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34: 2314422.
- [ 4 ] SHIN H G, TIMILSINA S, SOHN K S, *et al.* Digital image correlation compatible mechanoluminescent skin for structural health monitoring [J]. *Advanced Science*, 2022, 9: 2105889.
- [ 5 ] SOU K W, CHAN W S, LEI K C, *et al.* A bio-inspired event-driven mechanoluminescent visuotactile sensor for intelligent interactions [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(20): 2420872.
- [ 6 ] HAIDER S S, BARAN M, DIDUSZKO R, *et al.* Visible to near-infrared mechanoluminescence from Pr-doped LiTaO<sub>3</sub> for stress-sensing applications [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2024, 128(1): 489-498.
- [ 7 ] CHEN C J, LIN Z, HUANG H H, *et al.* Revealing the intrinsic decay of mechanoluminescence for achieving ultrafast-response stress sensing [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33: 2304917.
- [ 8 ] SOON M J, SONG S K, LEE S K, *et al.* Mechanically driven light-generator with high durability [J]. *Applied Physics Let-*

- ters, 2013, 102(5): 051110.
- [ 9 ] HOU B, YI L Y, LI C, *et al.* An interactive mouthguard based on mechanoluminescence-powered optical fibre sensors for bite-controlled device operation [J]. *Nature Electronics*, 2022, 5: 682-693.
- [ 10 ] YANG H, WEI Y, JU H N, *et al.* Microstrain-stimulated elasto-mechanoluminescence with dual-mode stress sensing [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36: 2401296.
- [ 11 ] DENG Y, PENG D N, SHEN C L, *et al.* Energy transfer-assisted color conversion of persistent mechanoluminescence in RhB@SiO<sub>2</sub>/SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: Eu, Dy system for multilevel information encryption [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(8): 2400251.
- [ 12 ] LV X, DUAN T, FANG S, *et al.* Self-powered mechanoluminescent elastomer for solar-blind ultraviolet emission [J]. *Light: Science & Applications*, 2026, 15(1): 61.
- [ 13 ] LIU H, SHAO Y, SONG Z, *et al.* Mechanoluminescence of ZnS under easily tailored phase transitions [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(45): e11469.
- [ 14 ] ZHANG S, YANG X, XIAO J, *et al.* Dual-mode mechanoluminescence induced by triboelectricity and frictional heat in transparent fluoride glass ceramic [J]. *Small*, 2025, 21(38): e05477.
- [ 15 ] YOO S K, JEONG I H, BANDYOPADHYAY S, *et al.* Ultrathin silica-encapsulated perovskite nanocrystals for high color purity mechanoluminescence [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 496: 154042.
- [ 16 ] Pan X, Zhuang Y X, He W. *et al.* Quantifying the interfacial triboelectricity in inorganic-organic composite mechanoluminescent materials [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 2673.
- [ 17 ] Ye Z, Fang S, Zhang T, *et al.* Ultrasensitive Pa-Level Persistent Mechanoluminescent Material Toward All-Optical Neural Synapses for Tactile-Visual Information Recognition and Memory [J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(3): e14909.
- [ 18 ] Chang S, Zhang K, Liu H, *et al.* Hair-Like Mechanoluminescent Structures with Ultralow Activation Threshold for Dynamic Force Sensing [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(35): e2507634.
- [ 19 ] Ma X, Wang J, Li J, *et al.* Visually encoded mechanoluminescence through hierarchical structuring with microscale patterns and nanoscale features [J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 9550.
- [ 20 ] Cheng H, Fang S, Li Y, *et al.* Mechano-electro-optical conversion dynamics in mechanoluminescence and its application in remote human - robot interaction [J]. *Photonix*, 2025, 6(1): 50.
- [ 21 ] Teng X C, Ren X, Zhang Y, *et al.* A simple 3D re-entrant auxetic metamaterial with enhanced energy absorption [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 229: 107524.
- [ 22 ] Kang S H, Kim S, Song H, *et al.* Skin-Tailored Adhesive Bio-Electrode with Tunable Poisson's Ratio for Stable Electrophysiological Communication [J]. *Adv. Healthcare Mater.* 2025, 14(10): 2404882.



张天成(1995-),男,浙江温州人,博士研究生,2022年于浙江理工大学获得硕士学位,主要从事应力发光可穿戴器件研究。

E-mail: ztc950409@163.com



王乐(1981-),女,博士,二级教授,博士生导师,2012年于浙江大学获得博士学位,主要从事新型光转换材料、智能感知与光电智能检测仪器的相关研究。

E-mail: calla@cjlu.edu.cn



房双强(1989-),男,博士,副教授,硕士生导师,2022年于俄罗斯托姆斯克理工大学获得博士学位,主要从事无机光功能材料、智能感知与人机交互的相关研究。

E-mail: fsq1025@163.com