

文章编号: 1000-7032(2025)07-1317-09

ZnS:Cu基液体桥接ACEL纤维器件的制备及应用

刘明宇^{1,2,3}, 张英^{1,2,3}, 陈漪^{1,2,3}, 李子晴^{1,2}, 张超^{1,2}, 王珣^{1,2,3},
钱屠聪颖^{1,2}, 胡毅^{1,2,3*}

(1. 浙江理工大学 纺织科学与工程学院(国际丝绸学院), 生态染整技术教育部工程研究中心, 浙江 杭州 310018;

2. 中国纺织工业联合会 染整节能减排重点实验室, 浙江 杭州 310018;

3. 浙江理工大学 嵊州创新研究院, 浙江 绍兴 312400)

摘要: 随着电子器件的快速发展以及人们对于柔性可穿戴显示器件的需求, 急需开发一种柔性的电致发光纤维器件。本文使用共轭静电纺丝方法制备了一种ZnS:Cu基液体桥接ACEL纤维器件, 测试表明器件具备良好的力学性能和电致发光性能。探究了静电纺丝层数和电压对纤维发光性能的影响, 随着纺丝层数的增加, 纤维发光亮度呈现出先增大再减小的趋势, 在层数为3层时电致发光性能最好; 随着驱动电压的增大, 纤维的发光亮度逐渐增大, 在 $3.77\text{ V}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 、10 kHz的驱动条件下发光纤维的亮度可达 $192.5\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。本工作制备的电致发光纤维可有效区分不同液体电极, 具备应用于特定场景下液体种类和浓度识别的功能。此外, 还可通过将电致发光纤维嵌入面料形成带有信息的图案以实现可视化信息交互。

关键词: ZnS:Cu; ACEL纤维器件; 液体桥接; 共轭静电纺丝

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

DOI: 10. 37188/CJL. 20250007

CSTR: 32170. 14. CJL. 20250007

Preparation and Application of ZnS:Cu-based Liquid Bridged ACEL Fiber Device

LIU Mingyu^{1,2,3}, ZHANG Ying^{1,2,3}, CHEN Yi^{1,2,3}, LI Ziqing^{1,2}, ZHANG Chao^{1,2}, WANG Xun^{1,2,3},
QIAN Tucongying^{1,2}, HU Yi^{1,2,3*}

(1. School of Textile Science and Engineering (International Silk Institute), Engineering Research Center of Ecological Dyeing and Finishing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Key Laboratory of Dyeing and Finishing Energy Saving and Emission Reduction, China Textile Industry Federation, Hangzhou 310018, China;

3. Shengzhou Innovation Research Institute, Zhejiang University of Science and Technology, Shaoxing 312400, China)

* Corresponding Author, E-mail: huyi-v@zstu. edu. cn

Abstract: With the rapid development of electronic devices and the demand for flexible wearable display devices, it is urgent to develop a flexible electroluminescent fiber device. In this paper, a ZnS:Cu-based liquid bridged ACEL fiber device was prepared by the method of conjugate electrospinning. The test results show that the device has good mechanical properties and electroluminescence properties. The effects of electrospinning layer number and voltage on the luminescence properties of fibers were investigated. With the increase of spinning layer number, the luminescence intensity of fibers increased first and then decreased, and the electroluminescence performance was the best when the number of layers was 3. With the increase of the driving voltage, the luminance of the fiber gradually increases, and the luminance of the luminous fiber can reach $192.5\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ under the driving condition of $3.77\text{ V}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ and 10 kHz. The electroluminescent fibers prepared in this work can effectively distinguish different liquid electrodes, and have the

收稿日期: 2025-01-07; 修订日期: 2025-01-20

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY21E030023); 浙江理工大学嵊州创新研究院项目(SYY2024C000008)

Zhejiang Natural Science Foundation Project (LY21E030023); Zhejiang Sci-Tech University Shengzhou Innovation Research Institute Project (SYY2024C000008)

function of identifying liquid types and concentrations in specific scenarios. In addition, visual information interaction can be achieved by embedding electroluminescent fibers into the fabric to form patterns with information.

Key words: ZnS:Cu; ACEL fiber device; liquid bridge; conjugate electrospinning

1 引 言

随着智能电子设备的快速发展,功能电子器件逐渐被开发并应用于可穿戴电子纺织品^[1-5]。对于可穿戴电子纺织品而言,集成显示^[6-7]、供能^[8-9]、传感^[10-12]等模块十分重要。人类对外界信息的获取主要是通过视觉、听觉和触觉,听觉和触觉信号需要通过视觉交互进行信息表达^[7, 13-14]。因此,实现来自人体或者外界传感信号的可视化显示极为关键,能进行发光显示的柔性电子纺织品引起人们的广泛关注^[15-18]。传统的发光薄膜、发光织物通常存在透气性差、不易编织、难以图案化等问题,而柔性纤维电子器件具备良好的柔韧性,可编织成透气性良好的织物与其他可穿戴电子模块集成^[10, 19-23]。其中,基于 ZnS 的交流电致发光(ACEL)纤维器件具备制备工艺简单、能耗低、发光寿命长等特点,并且易于制备成柔性发光显示器件应用于可穿戴电子纺织品,逐渐成为柔性可穿戴发光显示领域的研究热点^[24-27]。

目前,ZnS 基 ACEL 纤维器件的制备一般可通过浸涂法、熔融纺丝以及湿法纺丝等途径实现。Liang 等^[28]通过简单的全溶液浸涂法成功制备出同轴结构 ACEL 纤维,该纤维表现出均匀、明亮且全向的发光特性。Peng 等^[1]通过熔融纺丝和浸涂法制备了同轴结构的透明导电纬纱和发光经纱,使用工业剑杆织机将经纬纱与棉纱一同织造成 6 m 长、25 cm 宽的显示纺织品,验证了发光纤维在可穿戴显示方面的潜力。基于同轴结构 ACEL 纤维全向发光的优异特性,有团队进一步开发了同轴结构 ACEL 纤维的简易制备技术。Tian 等^[29]提出了一种基于 ACEL 纤维器件的液体响应结构,通过可拓展制备的湿法纺丝工艺制造了一种单电极电致发光纤维,该纤维可以在流体刺激的情况下表现出视觉交互效果应用于环境预警。值得注意的是,同轴结构的单电极 ACEL 纤维的制备方法相较于双电极 ACEL 纤维更为简单,在连续制造方面更有前景。然而,目前其制备方法仍有待进一步探索,以提高纤维制备效率和发光性能,推动 ZnS 基 ACEL 纤维器件在更多领域的应用^[30-31]。

基于此,本研究使用镀银尼龙导电纤维作为基材,利用可拓展制备的共轭静电纺丝技术将 ZnS:Cu 发光材料嵌入到 PVDF-HFP 微纳米纤维基体中,最后使用水性聚氨酯对电致发光纤维进行封装,得到了可拓展制备的液体桥接 ACEL 纤维器件。探究了静电纺丝层数和 ZnS:Cu 含量对电致发光纤维发光亮度的影响,并测试了其力学性能和电致发光性能,在 400 V、10 kHz 的驱动条件下电致发光纤维的亮度可达 $192.5 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$,可应用于液体识别和可视化信息交互领域。本研究可为液体桥接 ACEL 纤维器件的可拓展制备提供参考,为 ZnS 发光材料在智能电子纺织品上的应用提供新的思路,对于发光材料与器件在柔性可穿戴显示领域的高值化利用具有重要意义。

2 实 验

2.1 试剂与仪器

实验材料:镀银尼龙导电纤维(600D*3,苏州泰克银纤维科技有限公司),ZnS:Cu 发光粉(D512CT,上海科炎光电技术有限公司),聚偏氟乙烯-六氟丙烯共聚物(PVDF-HFP)(Kynar Flex 2801,上海爱纯生物科技有限公司),丙酮(AR,湖州双林化学科技有限公司),N,N-二甲基甲酰胺(DMF)(AR,杭州高晶精细化工有限公司),水性聚氨酯(WPU)(F0402,深圳市吉田化工有限公司),乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)(AR,杭州高晶精细化工有限公司),氯化钠(NaCl)(AR,上海易恩化学技术有限公司)。

实验仪器:扫描电子显微镜(SEM)(Ultra 55,德国 Carl Zeiss SMT 私人有限公司),高性能荧光寿命和稳态光谱仪(FluoTime 300,德国 Pico-Quant 公司),旋转流变仪(MCR52,奥地利 Anton Paar 公司),织物强力机(YG026Q,宁波纺织仪器厂),函数/任意波形发生器(FY6900,郑州飞逸科技有限公司),高压放大器(ATA-7015,西安安泰电子科技有限公司),光谱辐射计(PR670,美国 Photo Research 公司)。

2.2 ZnS:Cu 基液体桥接 ACEL 纤维器件的制备

称取 12 g N,N-二甲基甲酰胺(DMF)和 8 g 丙

酮并混合均匀,并向其中缓慢加入 4 g PVDF-HFP 搅拌至聚合物完全溶解后,加入 8 g ZnS:Cu 发光粉,将溶液在磁力搅拌器上搅拌 6 h 后得到纺丝溶液。使用纺丝溶液进行共轭静电纺丝,将 PVDF-HFP/ZnS:Cu 发光材料负载到镀银尼龙导电纤维上,纺丝条件为:流速 $0.8 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$,转速 $165 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,移动速度 $1.4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,电压 8.5 kV。使用水性聚氨酯对纺丝后的微纳米纤维包芯纱进行封装后,得到液体桥接 ACEL 纤维器件。

2.3 测试与表征

通过扫描电子显微镜观察 ZnS:Cu 发光粉和电致发光纤维的形貌和微观结构。采用高性能荧光寿命和稳态光谱仪测量 ZnS:Cu 发光粉的 PL 光谱。使用旋转流变仪测试发光纺丝溶液的流变性能。利用织物强力机测试电致发光纤维的拉伸断裂性能。通过函数/任意波形发生器和高压放大器对电致发光纤维进行驱动,同时采用光谱辐射计测试不同电压和频率下电致发光纤维的亮度、EL 光谱及色坐标(CIE 1931)。

3 结果与讨论

3.1 液体桥接 ACEL 纤维的连续制备、结构及微观形貌

电致发光纤维的制备流程如图 1(a)所示,通过共轭静电纺丝的方法在镀银尼龙导纤维表面均匀包覆 ZnS:Cu/PVDF-HFP 微纳米纤维发光层,烘干后再浸涂水性聚氨酯,最后得到液体桥接 ACEL 纤维器件。图 1(b)、(c)展示了液体桥接 ACEL 纤维器件的工作原理和横截面积示意图。从内到外分别是导电纤维、发光层、WPU 封装层,各层的厚度分别约为 $604 \mu\text{m}$ 、 $66 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$ 。ZnS:Cu/PVDF-HFP 微纳米纤维复合发光层的场致发光可归因于其内部的电子跃迁。通过交流电源在导电纤维和液体电极上施加交流电压,使得 ZnS:Cu/PVDF-HFP 微纳米纤维发光层受到电场作用,ZnS 晶格中的电子在电场作用下会获得能量,电子从价带被激发到导带,随后又会跃迁回价带并与空穴复合,在该过程中以光子的形式释放能量,从而产生场致发光现象。由于聚合物 PVDF-HFP 的介电常数较高,可有效集中电场能量

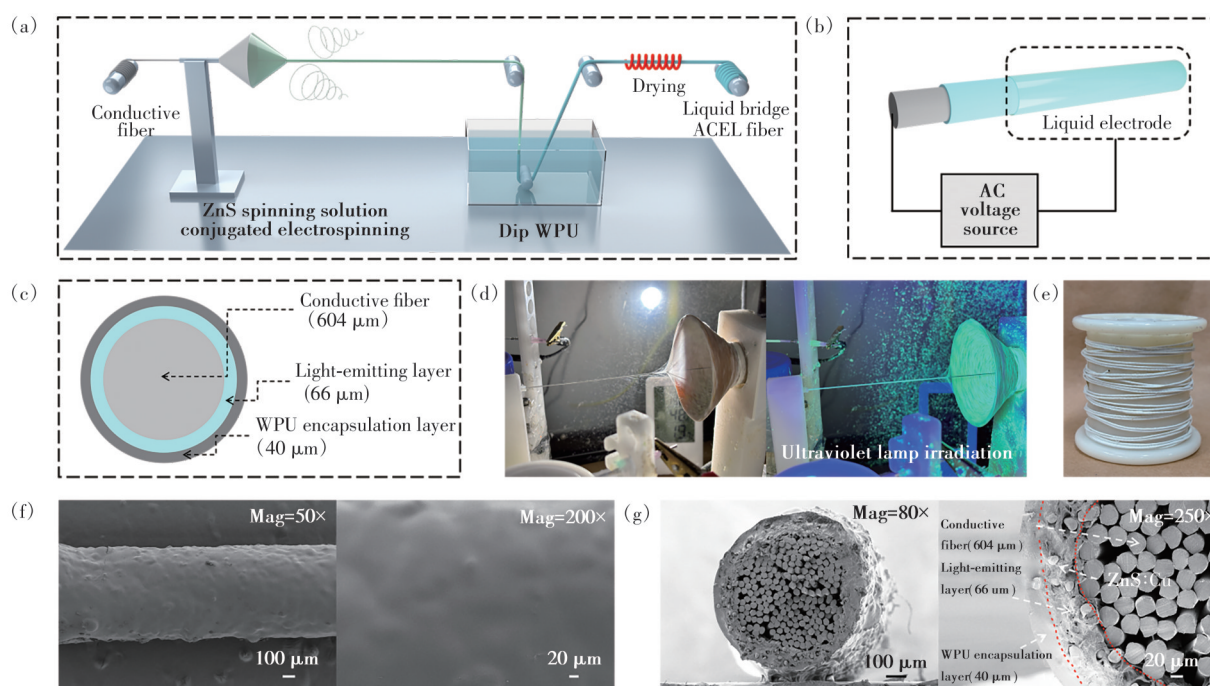


图1 液体桥接 ACEL 纤维的连续制备、结构及微观形貌。(a)纤维连续制备流程图;(b)纤维结构示意图;(c)纤维横截面积示意图;(d)纤维共轭静电纺丝过程数码照片;(e)纺丝后电致发光纤维不发光状态的实物照片;(f)WPU 封装后纤维表面 SEM 图像;(g)WPU 封装后纤维截面 SEM 图像

Fig. 1 Continuous preparation, structure, and microstructure of liquid bridged ACEL fiber. (a) Flow chart for the continuous preparation of fibers. (b) Schematic diagram of fiber structure. (c) Schematic diagram of the fiber cross-sectional area. (d) Digital photographs of the fiber conjugated electrospinning process. (e) Physical photographs of the non-luminous state of the electroluminescent fiber after spinning. (f) SEM image of fiber surface after WPU packaging. (g) SEM image of fiber cross-section after WPU packaging

于 ZnS,改善器件的电场分布,使器件在较低电压下仍能产生较好的电致发光效果。此外,同轴的结构保证了纤维器件工作时施加在 ZnS:Cu 发光层上电场的相对均匀性。图 1(d)展示了纤维共轭静电纺丝过程的数码照片,通过紫外灯照射可发现纤维表面产生荧光现象,说明 ZnS:Cu 发光材料均匀附着在导电纤维上。图 1(e)为纤维纺丝后不发光状态的实物照片。通过 WPU 封装后的液体桥接 ACCEL 纤维表面 SEM 图像(图 1(f))可知封装后纤维表面较为光滑,由纤维截面 SEM 图像(图 1(g))可

观察到,ZnS:Cu 发光材料有效附着于纤维截面,并且分布较为均匀,再次证明了共轭静电纺丝方法实现 ZnS:Cu 发光材料在纤维表面均匀负载的可行性。

3.2 发光材料表征及纤维性能优化与测试

首先,对 ZnS:Cu 发光粉进行了相关表征。图 2(a)显示的 SEM 图像可以看出 ZnS:Cu 发光粉大致呈颗粒状分布,表面较为光滑。图 2(b)展示了 ZnS:Cu 发光粉的光致发光(PL)光谱,在激发波长为 375 nm 的条件下,数据显示 ZnS:Cu 发光粉的最大发射波长为 476 nm。

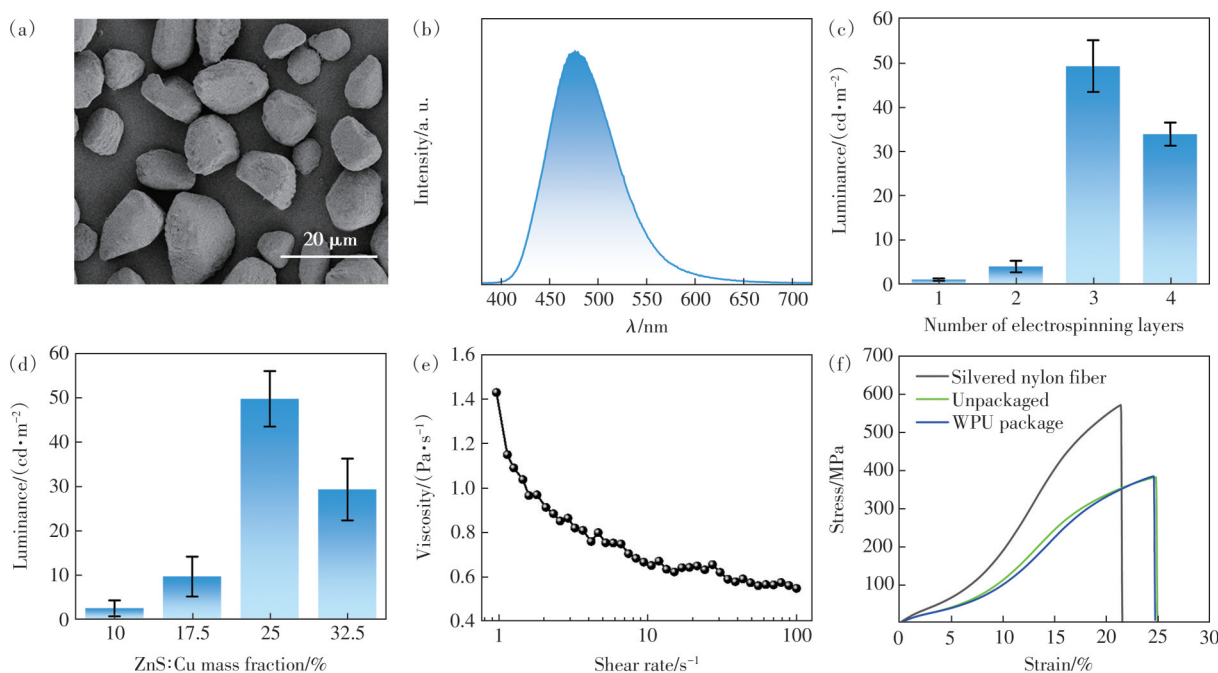


图 2 ZnS:Cu 发光材料和电致发光纤维表征。(a)ZnS:Cu 发光粉 SEM 图像;(b)ZnS:Cu 发光粉 PL 光谱;(c)纺丝层数对电致发光纤维亮度的影响;(d)发光粉含量对电致发光纤维亮度的影响;(e)纺丝液流变性能;(f)电致发光纤维力学性能

Fig. 2 Characterization of ZnS:Cu luminescent materials and electroluminescent fibers. (a) SEM images of ZnS:Cu luminescent powder. (b) ZnS:Cu luminescent powder PL spectrum. (c) The effect of the number of spinning layers on the luminance of electroluminescent fibers. (d) The influence of luminescent powder content on the luminance of electroluminescent fibers. (e) Rheological properties of spinning fluid. (f) Mechanical properties of electroluminescent fibers

静电纺丝的工艺对液体桥接 ACCEL 纤维的电致发光亮度具有一定的影响。当发光粉含量(质量分数,下同)为 25.0% 时,对静电纺丝层数为 1, 2, 3, 4 的电致发光纤维进行了亮度测试,使用商用便携式驱动器对电致发光纤维器件进行驱动。图 2(c)显示了静电纺丝层数对电致发光亮度的影响。当静电纺丝层数为 1 层时,电致发光纤维亮度很低或者器件失去性能,这是由于纺丝层数为 1 层,发光粉负载量低以及中间发光层太薄导致器件易击穿不稳定造成的。随着静电纺丝层数从 2 层逐渐增大到 4 层,纤维发光亮度呈现出先增大再减小的趋势,亮度最高可达 56.25 cd·m⁻²。静电纺丝层数

对电致发光纤维亮度的影响是发光粉含量和功能层厚度共同作用的结果。在纺丝层数为 1~3 层时,发光粉含量增加的正面效应占主导。随着纺丝层数的增加,发光层中的 ZnS:Cu 颗粒含量相应提高,更多的 ZnS:Cu 颗粒意味着可以形成更多的电子-空穴复合中心,在电场作用下,能够参与跃迁和复合过程的电子数量增多,从而使得发光亮度增加。随着纺丝层数从 3 层增加到 4 层,发光层厚度增加导致电场强度减小的负面效应超过了 ZnS:Cu 颗粒含量增加的效应。根据公式:

$$E = \frac{U}{d}, \quad (1)$$

其中, E 为电场强度, U 为交流电压大小, d 为两电极之间距离。发光层厚度的增加会导致电场强度降低, 不利于电荷载流子的注入和迁移, 从而降低发光效率导致发光亮度降低。

由于发光粉含量的增加对器件的厚度并无明显影响, 且可提升器件发光层上的发光粉含量从而提升电致发光亮度。综合考虑将静电纺丝层数定为3层, 进一步测试了纺丝液中发光粉含量分别为10.0%、17.5%、25.0%和32.5%时电致发光纤维的亮度。图S1展示了不同浓度纺丝液共轭静电纺丝后在导电纤维表面形成的发光层表面、截面SEM图像。从SEM图像可以看出, ZnS:Cu颗粒通过PVDF-HFP微纳米纤维的包缠作用较稳定地负载于芯层导电纤维上。图2(d)显示了发光粉含量对电致发光亮度的影响, 随着发光粉含量从10.0%逐渐增大到25.0%, 器件亮度从 $4.47 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $56.04 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, 这是由于ZnS:Cu浓度的增加使得纤维上ZnS:Cu负载量增大造成的; 而当发光粉含量达到32.5%时, 器件亮度降低到 $37.13 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, 这种现象是由于添加无机发光材料ZnS:Cu过多对纺丝溶液的稳定性造成了负面影响, 从而导致纺丝过程不稳定, 最终负载在纤维表面的ZnS:Cu负载量减少。

综上, 确定静电纺丝的参数为发光粉含量25.0%、纺丝层数3层, 这样的纺丝工艺保证了器件工作的稳定性, 同时也实现了ZnS:Cu在纤维表面的大量负载。如图2(e)所示, 对发光粉含量为25.0%的纺丝溶液的流变性能进行了测试, 采用对数剪切速率扫描, 剪切速率为 $1\sim 100 \text{ s}^{-1}$ 。随着剪切速率的增加纺丝溶液的粘度降低, 产生剪切变稀的现象。如图2(f)所示, 根据GB/T 3916-2013, 在隔距长度25 cm、拉伸距离 $25 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的测试条件下对镀银尼龙导电纤维、包覆发光层纤维、封装后纤维的力学性能进行测试。镀银尼龙导电纤维的断裂强度为571.1 MPa, 断裂伸长率21.4%; 包覆发光层纤维的断裂强度为381.1 MPa, 断裂伸长率24.8%; 封装后纤维的断裂强度为384.1 MPa, 断裂伸长率24.6%。发光层的包覆以及水性聚氨酯的封装提升了纤维的断裂伸长率, 纵使纤维的断裂强度有一定的降低, 但是基本不影响电致发光纤维的正常工作。

3.3 电压和频率对液体桥接 ACEL 纤维电致发光性能的影响

电压和频率对液体桥接 ACEL 纤维电致发光性

能具有显著的影响。通过函数/任意波形发生器和高压放大器结合实时调节电压和频率驱动电致发光纤维工作, 同时使用光谱辐射计采集不同电压和频率下电致发光纤维的亮度、EL光谱及色坐标(CIE 1931)。在定频率1 kHz的条件下, 分别测试电致发光纤维在 $0.94\sim 3.77 \text{ V}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 电场强度下的电致发光亮度、EL光谱和色坐标(CIE 1931)。类似地, 分别测量电致发光纤维在频率为2~10 kHz时不同电场强度下的电致发光亮度、EL光谱和色坐标(CIE 1931)。

电致发光纤维的电致发光亮度如图3(a)所示, 当频率一定时, 随着电场强度的不断增大, 电致发光纤维的亮度逐渐增强; 当电场强度一定时, 随着频率的不断增大, 电致发光纤维的亮度也逐渐增强。但是, 从图中可以看出电压对亮度的增幅远大于频率对亮度的增幅。在 $3.77 \text{ V}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 、10 kHz的驱动条件下发光纤维的亮度可达 $192.5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

此外, 为了探究定频率下电压的变化对纤维发光颜色的影响, 测试了纤维在频率4 kHz时不同电场强度下器件的EL光谱和对应的CIE色度图, 结果如图3(d)、(e)所示。当频率一定时, 随着电场强度的增大, 发光纤维的CIE色坐标基本稳定在(0.167 37, 0.304 01)左右, 器件发出蓝绿色的光。由此可见, 当频率一定时, 电压的变化对器件电致发光颜色的改变并无明显效果。图3(b)显示了5 kHz驱动频率下发光纤维发光颜色随电场强度变化的实物图, 纤维发光颜色基本保持稳定。

最后, 为了探究定电压下频率的变化对纤维发光颜色的影响, 测试了纤维在定电场强度 $2.83 \text{ V}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 时不同频率下器件的EL光谱和对应的CIE色度图。当电场强度一定时, 随着驱动频率的增大, 对应的CIE色坐标由(0.181 16, 0.411 46)变化为(0.160 85, 0.223 96), 发光纤维的发光颜色由绿色变为蓝色。由此可见, 当电压一定时, 频率的变化可以改变纤维器件的电致发光颜色。图3(c)展示了 $2.83 \text{ V}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 电场强度下发光纤维发光颜色随驱动频率变化的实物图, 纤维发光颜色发生明显的蓝移。

3.4 液体桥接 ACEL 纤维应用

液体桥接 ACEL 纤维在液体识别、发光显示以及柔性可穿戴等领域有着极大的应用潜力。为了探究液体电极种类对纤维亮度的影响, 使用商用便携式驱动器对液体桥接 ACEL 纤维进行驱动, 对纤维在水、乙醇、水性聚氨酯等液体电极中的发光亮度进行了测试。结果如图4(a)所示,

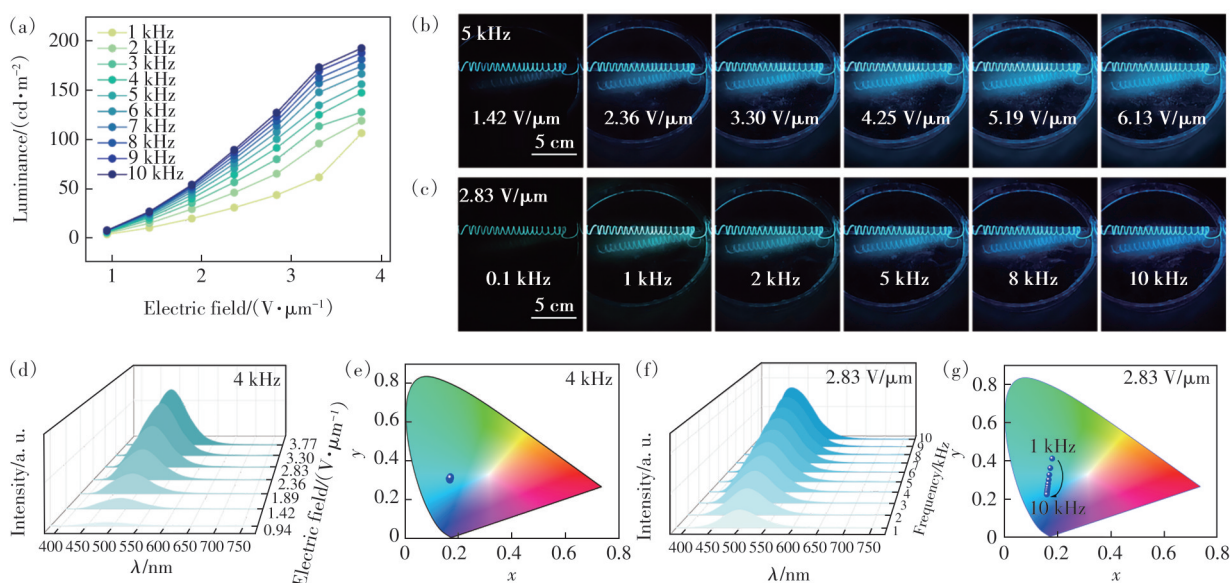


图3 电压和频率对液体桥接 ACEL 纤维发光性能的影响。(a)不同频率下电场强度变化对纤维亮度的影响;(b)5 kHz 不同电场强度下纤维发光实物图;(c)2.83 V/ μm 不同频率下纤维发光实物图;(d)4 kHz 不同电场强度下纤维的 EL 光谱;(e)4 kHz 不同电场强度下纤维的 CIE 色度图;(f)2.83 V/ μm 不同频率下纤维的 EL 光谱;(g)2.83 V/ μm 不同频率下纤维的 CIE 色度图

Fig.3 Effects of voltage and frequency on luminescence properties of liquid-bridged ACEL fibers. (a)The influence of electric field variation on fiber brightness at different frequencies. (b)Physical diagram of fiber luminescence at different electric field of 5 kHz. (c)Physical image of fiber luminescence at different frequencies of 2.83 V/ μm . (d)EL spectra of fibers at different electric field of 4 kHz. (e) CIE chromaticity diagram of fibers at different electric field of 4 kHz. (f) EL spectra of fibers at different frequencies of 2.83 V/ μm . (g) CIE chromaticity diagram of fibers at different frequencies of 2.83 V/ μm

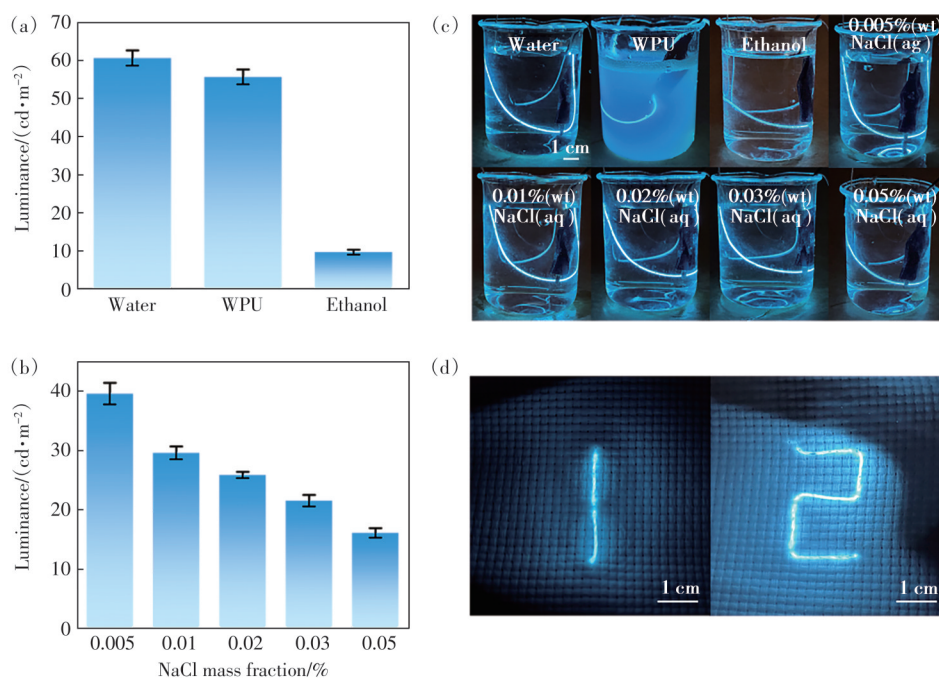


图4 液体桥接 ACEL 纤维应用。(a)不同种类液体电极对纤维亮度的影响;(b)不同浓度 NaCl 溶液对纤维亮度的影响;(c)纤维在不同种类、不同浓度液体电极中的发光实物图;(d)将电致发光纤维手工刺绣在纺织品上形成的数字图案发光实物图

Fig. 4 Liquid bridging ACEL fiber applications. (a) The effect of different types of liquid electrodes on the brightness of the fibers. (b) The influence of NaCl solution with a different concentration on fiber brightness. (c) A physical diagram of the luminescence of fibers in different types and concentrations of liquid electrodes. (d) Physical drawings of luminescent digital patterns formed by hand embroidery of electroluminescent fibers on textiles

水、水性聚氨酯、乙醇亮度分别为 60.58, 55.64, 9.69 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。同时,为了探究液体电极浓度对纤维亮度的影响,测试了纤维在不同浓度 NaCl 溶液中的发光亮度,结果如图 4(b)所示。随着 NaCl 溶液浓度的不断增加,纤维的发光亮度在 0.005%~0.05% (质量分数)范围内呈现出逐渐降低的趋势。图 4(c)展示了纤维在不同种类、不同浓度液体电极中的发光实物图,通过纤维在不同种类、不同浓度液体电极中的亮度差异,验证了其在液体种类和浓度识别领域的应用潜力。此外,电致发光纤维在可穿戴智能纺织品上有着广泛的应用。通过将其集成于纺织面料上可实现发光显示以及可视化信息交互,图 4(d)展示了将电致发光纤维手工刺绣在纺织品上形成的数字图案发光实物图,图案显示纤维发出明亮均匀的蓝光,呈现出清晰的信息传递。随着柔性显示技术的不断发展,液体桥接 ACEL 纤维有望与柔性传感、供能器件集成,在纺织品上形成具备信号采集、能源供应功能的发光显示系统,满足穿戴者对于智能服装的应用需求。

4 结 论

本工作使用一种工艺简单、可拓展制备的共轭静电纺丝方法,将 ZnS:Cu 发光材料嵌入到 PVDF-HFP 中形成稳定、均匀的发光层,再使用水性聚氨酯对纤维发光层表面进行封装处理,制备出一种结构简单、亮度可观的液体桥接 ACEL 纤维器件。具

体结论如下:(1)电致发光纤维由导电层、发光层、封装层组成,其具备良好的力学性能和电致发光性能。封装后纤维的断裂强度为 384.1 MPa,断裂伸长率 24.6%;在纺丝层数为 3 层、ZnS:Cu 含量(质量分数)为 25.0% 时发光纤维的发光效果达到最佳,电致发光亮度为 56.25 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$;通过调节施加的驱动电压和频率,纤维在 3.77 $\text{V}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 、10 kHz 的驱动条件下的亮度可达 192.5 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 。(2)液体桥接 ACEL 纤维器件的发光原理可归因于 ZnS:Cu 内部的电子跃迁。通过在该纤维芯层导电纤维和液体电极上施加交流电压,电子和空穴被注入发光层,并在 Cu^{2+} 附近复合,这种电子-空穴复合过程导致能量释放,从而实现纤维的场致发光。(3)本工作制备的电致发光纤维在液体识别和可视化信息交互领域具有极高的应用价值。纤维在水、乙醇、WPU 和不同浓度 NaCl 溶液等液体电极中呈现出不同的发光亮度,能有效区分不同种类和浓度的液体电极。该纤维还可以集成到纺织品中,通过将电致发光纤维嵌入面料形成带有信息的图案,可以实现可视化信息交互。随着柔性显示技术的不断进步与创新,液体桥接 ACEL 纤维器件有望在信息交互领域发挥更加重要的作用。

本文补充文件和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.20250007>

参 考 文 献:

- [1] SHI X, ZUO Y, ZHAI P, *et al.* Large-area display textiles integrated with functional systems [J]. *Nature*, 2021, 591 (7849): 240-245.
- [2] 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.
- [3] SHI Q W, SUN J Q, HOU C Y, *et al.* Advanced functional fiber and smart textile [J]. *Adv. Fiber Mater.*, 2019, 1(1): 3-31.
- [4] SUN H, ZHANG Y, ZHANG J, *et al.* Energy harvesting and storage in 1D devices [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2017, 2(6): 17023.
- [5] XING Y, XU Y M, WU Q L, *et al.* Optoelectronic functional fibers: materials, fabrication, and application for smart textiles [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(2): 439-455.
- [6] FU X M, WAN G X, GUO H C, *et al.* Self-healing actuatable electroluminescent fibres [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 10498.
- [7] 王玥, 杨伟峰, 陈浩廷, 等. 高性能 ZnS:Cu 基液致发光弹性体及其在视觉交互织物中的应用 [J]. *发光学报*, 2022, 43(10): 1609-1619.
WANG Y, YANG W F, CHEN H T, *et al.* High-performance ZnS:Cu based mechanoluminescent elastomers and their applications in visually interactive fabrics [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(10): 1609-1619. (in Chinese)

- [8] HE J Q, LU C H, JIANG H B, *et al.* Scalable production of high-performing woven lithium-ion fibre batteries [J]. *Nature*, 2021, 597(7874): 57-63.
- [9] SUN J L, CHANG Y, LIAO J, *et al.* Integrated, self-powered, and omni-transparent flexible electroluminescent display system [J]. *Nano Energy*, 2022, 99: 107392.
- [10] MIAO Z Y, YU R H, BAI X W, *et al.* Versatile graphene/polyelectrolyte aqueous dispersion for fiber-based wearable sensors and electroluminescent devices [J]. *Sci. China Mater.*, 2024, 67(6): 1915-1925.
- [11] QU C M, XU Y, XIAO Y, *et al.* Multifunctional displays and sensing platforms for the future: a review on flexible alternating current electroluminescence devices [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2021, 3(12): 5188-5210.
- [12] XU X R, HU D, YAN L J, *et al.* Polar-electrode-bridged electroluminescent displays: 2D sensors remotely communicating optically [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(41): 1703552.
- [13] YOO J, HA S B, LEE G H, *et al.* Stretchable high-resolution user-interactive synesthesia displays for visual-acoustic encryption [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(48): 2302473.
- [14] HU X L, ZHANG B, YOU C Y, *et al.* Non-noble metal electroluminescent fibers for visual monitoring and interaction [J]. *Adv. Fiber Mater.*, 2025, 7(1): 227-239.
- [15] YU X X, CHEN L F, ZHANG J Y, *et al.* Structural design of light-emitting fibers and fabrics for wearable and smart devices [J]. *Sci. Bull.*, 2024, 69(15): 2439-2455.
- [16] ZHANG Y, WANG X, ZHANG Y R, *et al.* Wearable alternating current electroluminescent e-textiles with high brightness enabled by fully sprayed layer-by-layer assembly [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(4): 2308969.
- [17] 朱杰, 杨群, 陶思轩, 等. 柔性无机电致发光器件及其在智能纺织品上的应用进展 [J]. *丝绸*, 2024, 61(8): 60-69.
- ZHU J, YANG Q, TAO S X, *et al.* Flexible inorganic electroluminescent devices and their application progress in smart textiles [J]. *J. Silk*, 2024, 61(8): 60-69. (in Chinese)
- [18] WANG L, XIAO L, GU H S, *et al.* Advances in alternating current electroluminescent devices [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(7): 1801154.
- [19] ZHANG K L, SHI X, JIANG H B, *et al.* Design and fabrication of wearable electronic textiles using twisted fiber-based threads [J]. *Nat. Protoc.*, 2024, 19(5): 1557-1589.
- [20] CHO S, CHANG T, YU T H, *et al.* Machine embroidery of light-emitting textiles with multicolor electroluminescent threads [J]. *Sci. Adv.*, 2024, 10(1): eadk4295.
- [21] 施翔, 王臻, 彭慧胜. 织物显示器件的研究进展 [J]. *纺织学报*, 2023, 44(1): 21-29.
- SHI X, WANG Z, PENG H S. Research progress in display units fabricated from textiles [J]. *J. Text. Res.*, 2023, 44(1): 21-29. (in Chinese)
- [22] LIU Y B, XU M L, LONG H, *et al.* Alternating current electroluminescence devices: recent advances and functional applications [J]. *Mater. Horiz.*, 2024, 11(21): 5147-5180.
- [23] MI H B, ZHONG L N, TANG X X, *et al.* Electroluminescent fabric woven by ultrastretchable fibers for arbitrarily controllable pattern display [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(9): 11260-11267.
- [24] LIU P Y, XIANG Y, LIU Y, *et al.* Color-tunable light-emitting fibers for pattern displaying textiles [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2024, 12(3): 941-947.
- [25] 郭素文, 杨伟峰, 胡云浩, 等. 硫化锌电致发光材料在智能可穿戴领域研究进展 [J]. *发光学报*, 2022, 43(5): 796-806.
- GUO S W, YANG W F, HU Y H, *et al.* Progress of zinc sulfide electroluminescent materials in intelligent wearable field [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(5): 796-806. (in Chinese)
- [26] LIU H Z, ZHENG Y T, LIU S Q, *et al.* Realizing red mechanoluminescence of ZnS: Mn²⁺ through ferromagnetic coupling [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(22): 2314422.
- [27] HUANG Z F, LI X, LIANG T L, *et al.* Smart mechanoluminescent phosphors: a review of zinc sulfide-based materials for advanced mechano-optical applications [J]. *Respons. Mater.*, 2024, 2(3): e20240019.
- [28] LIANG G J, YI M, HU H B, *et al.* Coaxial-structured weavable and wearable electroluminescent fibers [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2017, 3(12): 1700401.
- [29] LI G H, SUN F Q, ZHAO S K, *et al.* Autonomous electroluminescent textile for visual interaction and environmental

- warning [J]. *Nano Lett.*, 2023, 23(18): 8436-8444.
- [30] 李港华, 吕治家, 韦继超, 等. 基于 ZnS 材料的纺织基交流电致发光器件研究现状及展望 [J]. *丝绸*, 2023, 60(1): 29-39.
- LI G H, LÜ Z J, WEI J C, *et al.* Research status and prospect of textile-based flexible AC electroluminescent devices based on ZnS materials [J]. *J. Silk*, 2023, 60(1): 29-39. (in Chinese)
- [31] 常博雅, 郭素文, 郑岩, 等. 光与材料的交响: 硫化锌基场致发光纤维 [J]. *发光学报*, 2024, 45(11): 1758-1766.
- CHANG B Y, GUO S W, ZHENG Y, *et al.* Light and materials: zinc sulfide-based field-induced luminescent fibers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(11): 1758-1766. (in Chinese)



刘明宇(1998-),男,安徽太湖人,硕士研究生,2022年于安徽工程大学获得学士学位,主要从事柔性交流电致发光纤维器件的研究。

E-mail: 202230202129@mails.zstu.edu.cn



胡毅(1974-),男,湖北黄梅人,博士,教授,博士生导师,2008年于东华大学获得博士学位,主要从事电子智能纺织品的研究。

E-mail: huyi-v@zstu.edu.cn