

文章编号: 1000-7032(2024)07-1049-09

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

杨小锐, 杨伟峰, 李克睿, 李耀刚, 张青红, 王宏志, 侯成义*

(东华大学 材料科学与工程学院, 纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620)

摘要: 随着柔性电子产品、智能传感器、智能穿戴等领域的兴起, 柔性电致发光器件得到了蓬勃的发展。柔性电致发光纤维以其便携性、柔软性及可编织性, 为可视化传感领域带来了巨大的发展潜力。但受限于其大多为双电极结构, 制备工艺复杂, 使其在成本、器件均匀性、灵敏性及柔软性方面仍存在不足。本文开发了一种单电极电致发光纤维, 通过简单、可扩展和低成本的制造工艺, 实现了电致发光纤维的连续制备。且通过无线驱动的方式实现了电致发光, 单电极纤维接受无线电场能量, 通过接地线与大地、无线发射源形成闭合回路, 从而消除了对外部电源的依赖。单电极电致发光纤维由导电层、介质层和发光层构成, 发光波长为 456 nm, 具有良好的力学性能、发光性能及柔软性。单电极电致发光纤维可应用于溶液的可视化传感, 其发光强度对于氯化钠浓度的识别度可达到 0.001% (质量分数), 具有出色的灵敏度, 在汗液检测及生物等方面具有重要意义。发光纤维可进一步编织成发光织物, 其透气性及力学方面均与普通的商用面料相媲美, 并可实现不同浓度氯化钠的可视化传感。在可穿戴设备领域, 无线驱动的单电极电致发光纤维具有实现视觉显示和通信功能的巨大潜力。

关键词: 智能纤维; 可视化传感; 连续制备; 无线驱动

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240067

Continuous Preparation of Single-electrode Electroluminescent Fibers and Their Visual Liquid Sensing Applications

YANG Xiaorui, YANG Weifeng, LI Kerui, LI Yaogang, ZHANG Qinghong,

WANG Hongzhi, HOU Chengyi*

(State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, College of Materials Science and Engineering,

Donghua University, Shanghai 201620, China)

* Corresponding Author, E-mail: hcy@dhu.edu.cn

Abstract: The advent of flexible electronics, smart sensors, and intelligent wearables has catalyzed a burgeoning interest in flexible electroluminescent devices. These devices, particularly electroluminescent fibers, are distinguished by their portability, malleability, and integrability into textiles, offering substantial promise for advancements in visual sensing technology. However, due to their mostly dual-electrode structure and complex fabrication process, there are still shortcomings in terms of cost, device uniformity, sensitivity, and flexibility. This paper develops a single-electrode electroluminescent fiber and achieves continuous preparation of electroluminescent fibers through a simple, scalable, and low-cost manufacturing process. Electroluminescence is achieved through wireless driving. The single-electrode fiber receives energy from the wireless radio field and forms a closed loop with the wireless transmission source through the ground wire to the earth, thus eliminating the dependence on external power sources. The single-electrode electroluminescent fiber consists of a conductive layer, a dielectric layer, and a luminescent layer, with a luminescent wavelength of 456 nm. It has good mechanical performance, luminescent performance, and flexibility. We applied it to the visualization sensing of solutions, and

收稿日期: 2024-03-15; 修订日期: 2024-03-31

基金项目: 中央高校基本科研业务费; 东华大学励志计划(LZA2023001)

Supported by The Fundamental Research Funds for the Central Universities; DHU Distinguished Young Professor Program (LZA2023001)

its luminescent intensity can achieve a recognition degree of 0.001% (mass fraction) for sodium chloride concentration, demonstrating excellent sensitivity and significant implications for sweat detection and biology. We further weaved it into luminescent fabrics, which have comparable breathability and mechanical properties to ordinary commercial fabrics and can achieve visual sensing of different concentrations of sodium chloride. In the domain of wearable technology, wirelessly driven single-electrode electroluminescent fibers have enormous potential to achieve visual display and communication functions.

Key words: intelligent fibers; visual sensing; continuous preparation; wireless driving

1 引 言

开发一种灵敏、便携且成本低廉的传感器与可穿戴设备相结合,用于识别各类液体信息,特别是汗液、血液和尿液等,对于新兴的生物医学和医疗保健应用至关重要^[1-4]。当前可穿戴传感器形态主要有薄膜和纤维两种,相比于柔性电子领域常用的薄膜器件,纤维电子器件展现了更高的柔韧性^[5-6]、透气性^[7],在织物发生形变时能释放应力防止局部应力集中,因而具有更长的使用寿命和优越的服役性能^[8-12]。在液体传感监测方面,纤维电子器件能够与液体表面实现 360°全面接触,展现出更优异的监测性能。尽管存在这些优势,目前的可穿戴传感器为了提升灵敏度和准确性,普遍采用了电传感技术。然而,基于电学原理的可穿戴液体传感器面临以下挑战:首先,单一的电信号无法直接被肉眼识别,使得信息读取不够直观^[12-15];其次,由于对柔软性的高要求,纤维电子器件在低维化和纤维化过程中难以保持其性能^[17]。据研究报道,手工制作的电子纤维织物因其复杂的结构和材料体系,难以实现连续化生产。目前,编织双电极电致发光纤维的技术仍然不成熟。因此,现有的厘米级手工制作电子纤维产品在智能服装领域的推广遭遇了重大挑战^[18-20]。此外,现行的电致发光纤维多采用双电极结构,依赖有线驱动和连接庞大电源,这在纤维的厚度和柔软度方面未能满足可穿戴设备对细腻与柔软的需求^[21-22]。因此,迫切需要开发一种能够实现连续化生产并将信号可视化的无线驱动传感平台。

本研究成功开发了一种新型的单电极可视化传感纤维,该纤维能够通过连续化制备工艺生产,克服了传统发光纤维无法实现连续生产的技术限制。该纤维结构包括导电层、介质层和发光层,能够做到无线驱动。本文还对其发光机制进行了详细阐释。单电极电致发光纤维可应用于液体传

感,能对不同浓度的氯化钠溶液做出不同亮度的可视化响应,识别灵敏度达 0.001% (质量分数)。本文对单电极电致发光纤维的微观形貌,力学性能及发光性能进行了表征,进一步将其编织得到柔性智能发光织物。该智能发光织物的透气性和力学性能均优于传统商用面料,具有良好的柔软性和可塑性,能够紧密贴合人体轮廓。连续化制备技术及可视化传感应用赋予了单电极电致发光纤维在可穿戴设备中实现视觉表达与通信功能的重要潜力。

2 实 验

2.1 单电极电致发光纤维的制备

2.1.1 实验试剂与仪器

钛酸钡粉末(中国宁波雨木新材料有限公司), ZnS:Cu²⁺荧光粉(中国上海科炎光电技术有限公司), Cu@Ni 导电线(中国福建省青龙材料有限公司), 聚二甲基硅氧烷(PDMS)(美国陶氏康宁公司), NaCl(阿拉丁化学有限公司)。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。

2.1.2 电致发光纤维的制备

先称取适量钛酸钡粉末,与 PDMS(其中 PDMS 预聚体和固化剂按质量比 10:1 混合)按照 1.5:1 的比例混合,搅拌 10 min,并用真空干燥箱进行真空脱泡,得到钛酸钡混合浆料。再称取适量的 ZnS:Cu²⁺荧光粉,与 PDMS(其中 PDMS 弹性基质和固化剂按质量比 10:1 混合)按照 1.6:1 的比例混合,搅拌 10 min,并用真空干燥箱进行真空脱泡,得到发光粉混合浆料。将以上两种浆料放入 80 °C 的烘箱固化 8 min。将钛酸钡混合浆料倒入孔径为 0.35 mm 的槽道,将 ZnS:Cu²⁺荧光粉混合浆料倒入孔径为 0.5 mm 的槽道,使线轴上的 Cu@Ni 导电线先包覆 BaTiO₃混合浆料,并通过热固化隧道窑(170 °C)形成稳定的介质层。然后通

过 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 荧光粉混合浆料和热固化隧道窑 ($170\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下形成发光层。最后,纤维由线轴收集。

2.2 样品性能及表征

采用场发射扫描电子显微镜(Field emission scanning electron microscope, FESEM, MERLIN 卡尔·蔡司)和数字虚拟显微镜(DVM6,德国 Leica)表征电致发光纤维的微观形貌,使用数码相机(索尼 $\alpha 6300$, 日本)捕捉光学图像。使用万能试验机(Instron 5969, Instron Corporation, 美国)测试了电致发光纤维的机械性能。对电致发光电子器件的发射性能进行测试:使用光谱仪(SEK, Choptics Instruments, 中国上海)测试光谱,使用光功率计(2936-R, Newport Corporation)测试发光功率密度。采用多现场亮度计(LM-3)进行发光强度测试。使用透气性测试仪(YG461E, 温州方圆仪器有限公司, 中国)根据 GB/T 24218. 15-2018 标准测量了织物的透气性。实验在 100 Pa 的压力和 20 cm^2 的机孔面积条件下进行。

3 结果与讨论

3.1 单电极电致发光纤维的连续化制备

单电极电致发光纤维的连续化制备示意图及实物设备如图 1(a)所示。利用 $\text{Cu}@\text{Ni}$ 纤维(直径: 0.25 mm)作为纤维导线,穿过含有 BaTiO_3 浆料的纺丝槽道(孔道直径: 0.35 mm),经过热固化($170\text{ }^{\circ}\text{C}$)形成介质层。随后,通过装有 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 浆料的纺丝槽道(直径: 0.5 mm),经历热固化($170\text{ }^{\circ}\text{C}$)形成发光层^[23]。最后,将制备的纤维用滚轴收集起来。图 1(b)为成功制备的上百米纤维,并可实现进一步连续化生产。如图 1(c)所示为纤维结构示意图。通过图 1(d)的 SEM 和图 1(e)的超景深断面图可知纤维半径约为 $180\text{ }\mu\text{m}$,发光层厚度为 $37\text{ }\mu\text{m}$,钛酸钡层厚度为 $42\text{ }\mu\text{m}$ 。纤维表面的微观外表形貌如图 1(f)所示,表面有细小的荧光粉颗粒。纤维的柔软度很好,如图 1(g)所示,可以任意弯折且不会受损,满足当前轻质化、柔性化的可穿戴需求。

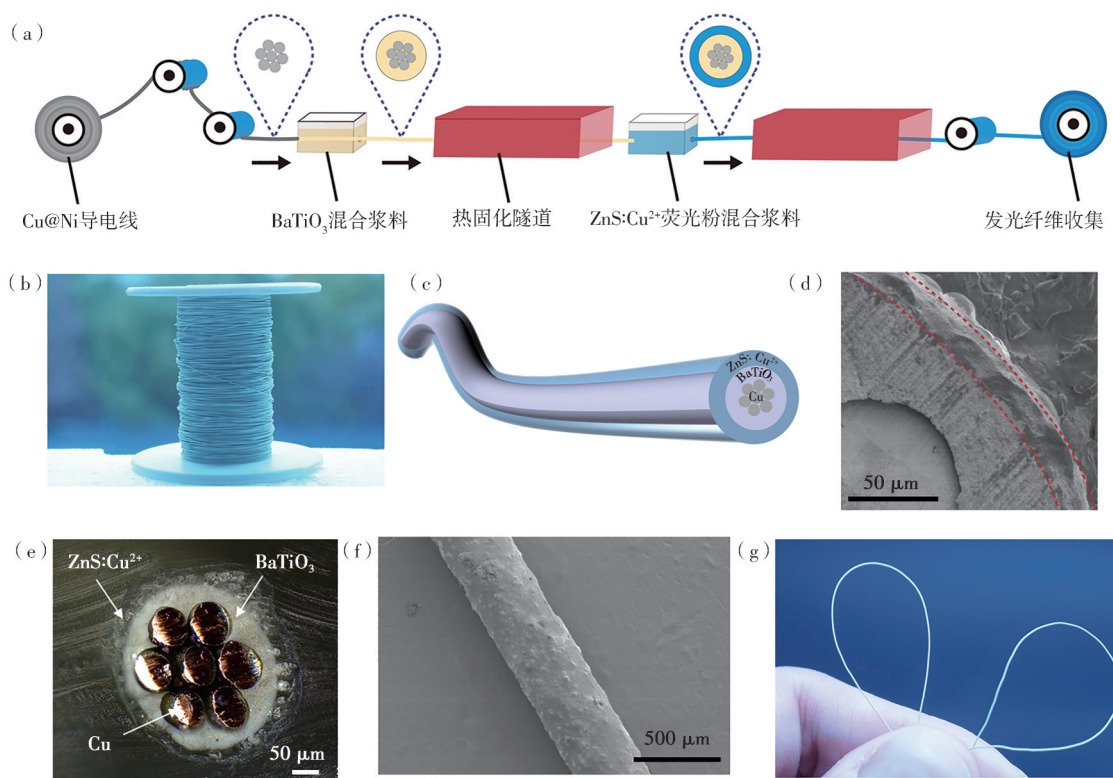


图1 单电极电致发光纤维的连续化制备及微观形貌。(a)纤维制备过程示意图及实物图;(b)实物图;(c)显微结构示意图;(d)截面SEM图;(e)超景深显微镜截面图;(f)表面形貌SEM表征;(g)实物图

Fig. 1 Continuous preparation and microstructure of single-electrode electroluminescent fibers. (a) Schematic diagram and actual photo of fiber preparation process. (b) Actual photo. (c) Microstructure schematic diagram. (d) SEM cross-section. (e) Super depth of field microscope cross-section image. (f) Surface morphology SEM characterization. (g) Actual photo

3.2 单电极电致发光原理

单电极电致发光纤维的发光示意图如图 2(a)所示,将导电布连接直流电源(电压为 9 V,功率为 1.17 W)及变频升压模块(DC 9 V 转 AC 300 V)形成一个无线驱动电场^[24-26],将装有待测液体的试剂瓶放于电场旁边,纤维放入液体中时形成一个闭合电路,从而使纤维发光。其无线驱动的电致发光原理如图 2(b)所示,纤维放于液体中,电源连接导电布成为一个能量发射场,当纤维和液体接收到远处的无线电场之后,液体与纤维及电源、大地,通过接地线形成了一个闭合回路。选择液体作为环境电磁场的接受介质是因为液体是由水作为溶剂的,而水($\epsilon \approx 78, \delta \approx 0.6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$)相比于空气($\epsilon \approx 1, \delta \approx 10^{-14} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$),有着很高的介电常数及较高的电导率,从而更容易收集环境中的电磁能量,使得电磁能量优先以电位移极化的形式在水分子之间不断传递到大地。这导致大部分电场能

量通过分子极化传递到发光纤维的表面,介电层使其电场能量得以储存,因此发光纤维能够发光。在液体中具体的无线发光原理如图 2(c)所示,水的高介电常数使得极性极板之间的电容耦合变得容易。水分子会增加发光纤维与发射源之间的电容耦合系数,当液体接触到发光纤维时,就会与纤维形成界面接触电容,使得电致发光纤维、大地、液体及发射源共同形成一个闭合的能量回路,使电磁能量场通过接地到达地球^[27]。发光层的荧光粉受到电场激发后发出光。其电致发光的详细原理包括 4 个连续过程^[24-26],如图 2(d),即(1)在交流电场下,绝缘体层和荧光粉层之间的界面态的电子注入荧光粉层;(2)注入的电子沿着导电带中的电场加速;(3)当电子遇到发光中心(杂质离子)时,发生冲击激发或冲击电离,产生激发态电子;(4)激发态电子的辐射去激发而发出光。借助荧光粉颗粒在聚合物粘合剂中的均匀分散,光在整个发射层中发射。

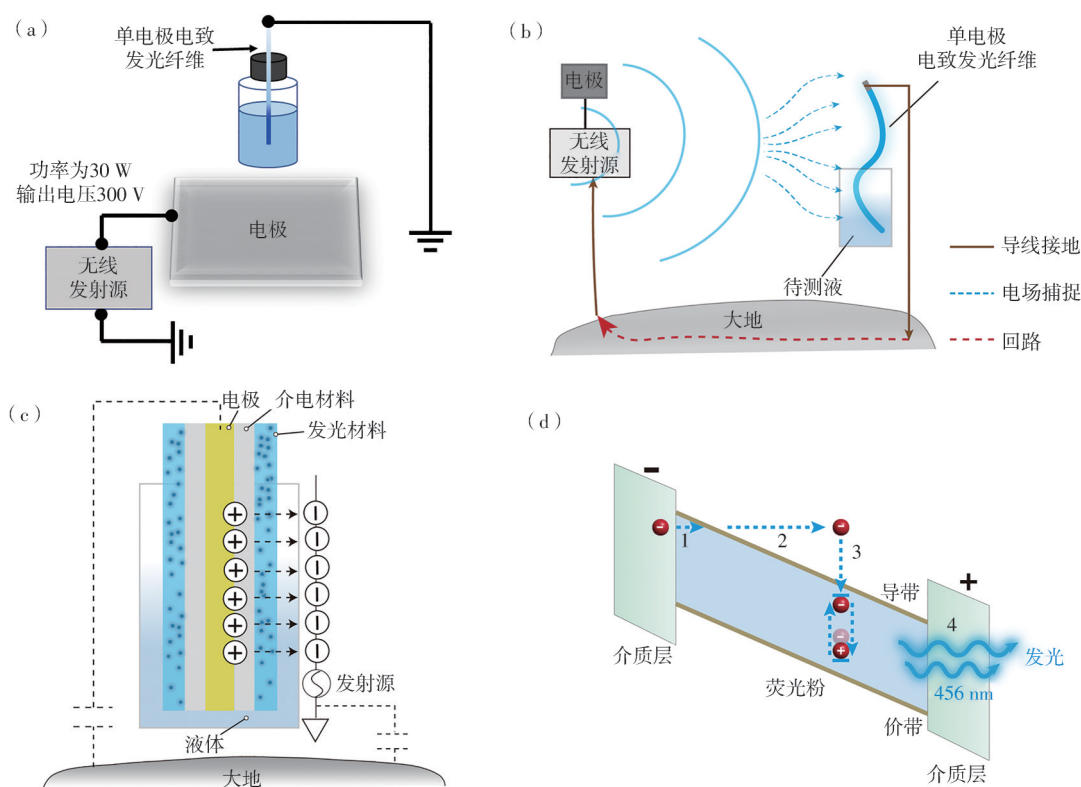


图 2 电致发光原理。(a)无线驱动单电极电致发光示意图;(b)无线驱动单电极电致发光原理图;(c)液体中无线驱动发光原理(d)电致发光原理图

Fig. 2 Principle of electroluminescence. (a) Schematic diagram of wireless drive single electrode electroluminescence. (b) Principle diagram of wireless drive single electrode electroluminescence. (c) Principle of wireless driven luminescence in liquid. (d) Electroluminescent principle diagram

3.3 单电极电致发光纤维的发光性能测试

图 3(a)展示了纤维在水中发光状态与非发

光状态的对照照片。图 3(b)为放大后的纤维发光图像,显示出其发光均匀性。即使在 120° 和

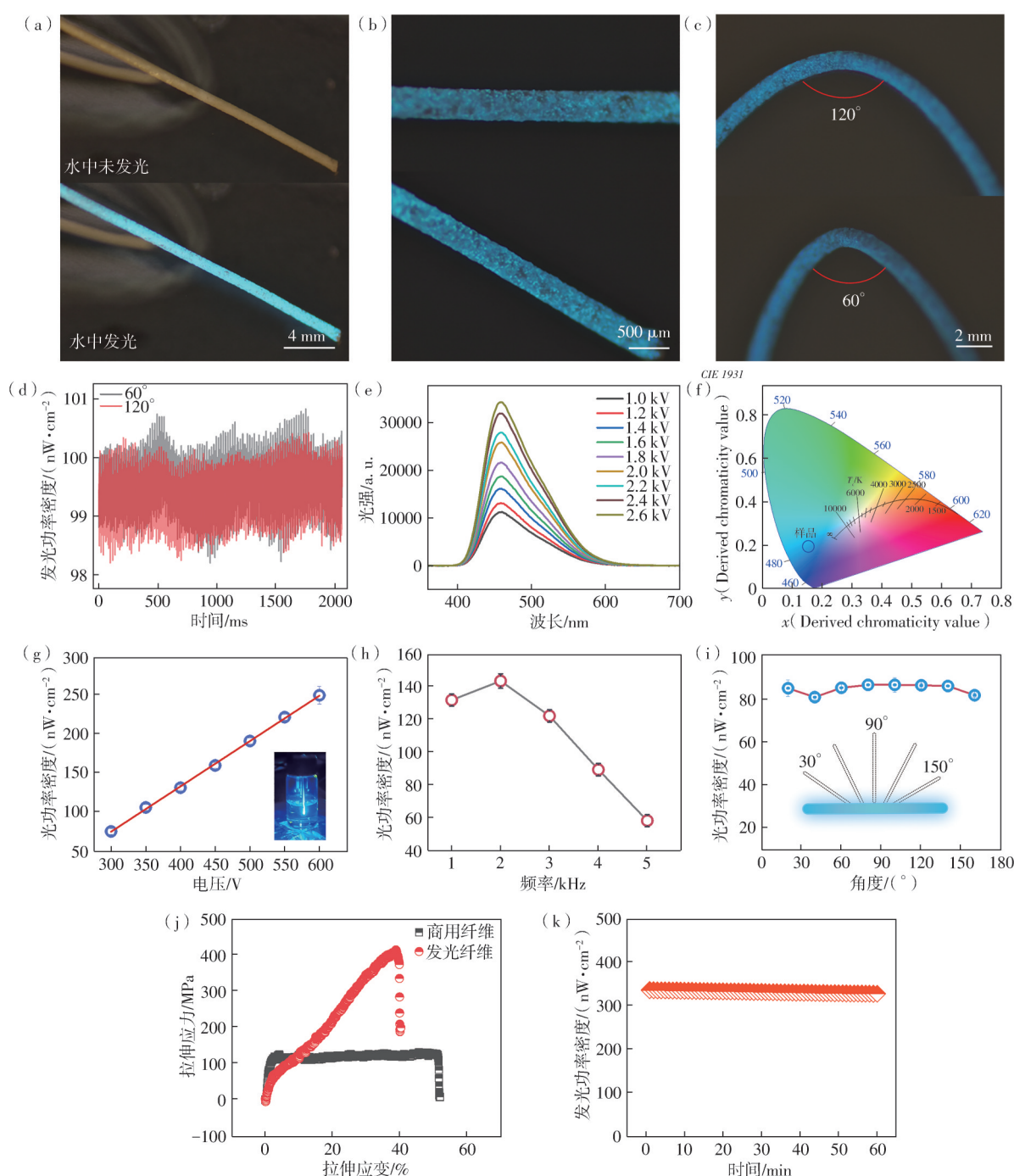


图3 单电极电致发光纤维的发光性能测试。(a)纤维在水中的发光图;(b)纤维在水中的发光放大图;(c)纤维弯折的发光图;(d)纤维弯折 60° 和 120° 下的发光功率密度;(e)不同电压下的发光光谱;(f)色度图;(g)不同电压下发光图;(h)不同频率下发光图;(i)不同角度测得的发光强度;(j)纤维力学测试;(k)纤维的发光稳定性

Fig. 3 Luminescence performance test of electroluminescent fibers. (a) Luminescence diagram of fiber in water. (b) Magnified image of the luminescence of fibres in water. (c) Luminescence pattern of bent fibres. (d) Optical power density of the fiber at the bending angle at 60° and 120° . (e) Luminescence spectra at different voltages. (f) Chromaticity diagram. (g) Luminescence diagram at different voltages. (h) Luminescence diagrams at different frequencies. (i) Luminous intensity measured at different angles. (j) Fibre mechanics tests. (k) Luminous stability of the fibers

60° 的弯曲状态下,亮度变化微小(见图3(c))。如图3(d)所示,在2 000 ms内其发光功率密度仅相差 0.5 nW/cm^2 。如图3(e)所示,从发光纤维在不

同电压下测量的光谱可看出其发光波长为456 nm。图3(f)为发光纤维的发光色度图,发出蓝色的光。纤维在空气中不同电压下测得的发光功率如图3(g)

所示,其发光功率与电压呈正比关系,充分证明了其灵敏性。在不同频率下(1~5 kHz),发光纤维的亮度也呈不同的趋势,说明其对电压和频率的灵敏度都较好(图 3(h))。图 3(i)是测试角度对其发光强度的影响,将测试探头放置在不同的角度对纤维亮度进行测试,可看出在不同角度测得的发光亮度保持在 85 nW/cm²左右,较为稳定。在纤维的力学方面,测试表明其拉伸应力为 420 MPa,比商用纤维 125 MPa 大,其耐用性较好,有助于其用于可穿戴传感领域(图 3(j))。对单电极电致发光纤维的反光寿命进行了测试,如图 3(k)所示,可看出在 60 min 内其亮度只下降了 2.4%。

3.4 单电极电致发光纤维的可视化汗液传感应用

Na⁺和 Cl⁻是汗液中含有最多的离子。单电极电致发光纤维可检测的氯化钠浓度范围为 0.17 ~ 5.128 mmol/L(质量分数 0.001% ~ 0.03%),而人的汗液中 Na⁺和 Cl⁻的浓度范围为 1 ~ 10 mmol/L^[28]。据报道,当女性氯化钠浓度大于 4 mmol/L 时,她们的后代患囊性纤维化的风险显著增加^[29]。然而,传统的汗液测试结果是以电信号的方式输出的,电信号需要进一步地转换为数字或曲线来供人们读取,无法实现直接可视化的检测^[30-31]。将发光纤维放在电压为 300 V、功率为 30 W 的无线电场中,

在不同浓度的氯化钠溶液中对其发光强度进行测试,如图 4(a)所示。在不同浓度的氯化钠溶液中纤维可产生不同的发光强度,且可肉眼分辨出其光强的变化。为了与以往的有线电致发光纤维发光强度进行比较^[32-36],图 4(b)用多现场亮度计对发光纤维在质量分数 0.001% ~ 0.03% 的氯化钠溶液中的发光强度进行了测试,在 300 V 的电场下其最高亮度可达到 180 cd/m²。与以往报道的有线电致发光纤维相比,其发光强度较低,这是因为单电极电致发光纤维采用无线驱动的方式进行供电,电源的电场能量有一部分分散在了环境中,从而使作用在纤维上的电压小于电源实际的电压。其发光强度的具体数据如图 4(b)所示,可发现盐溶液浓度的变化影响发光纤维接受电场的大小。这是由于离子浓度越高,离子在交变电场下发生偏转所需要的能量越多,所以导致施加在发光材料上面的电场强度会降低,最后导致发光强度变弱,导致发光纤维的发光强度随浓度的变化而改变。从图 4(b)的发光强度数据可得出其发光传感的灵敏度可以达到质量分数 0.001% 浓度的变化,具有很高的灵敏度。通过对不同浓度(质量分数以 0.001% 增加)氯化钠发光强度的测试可发现,氯化钠溶液的浓度越高,其发光强度越小。

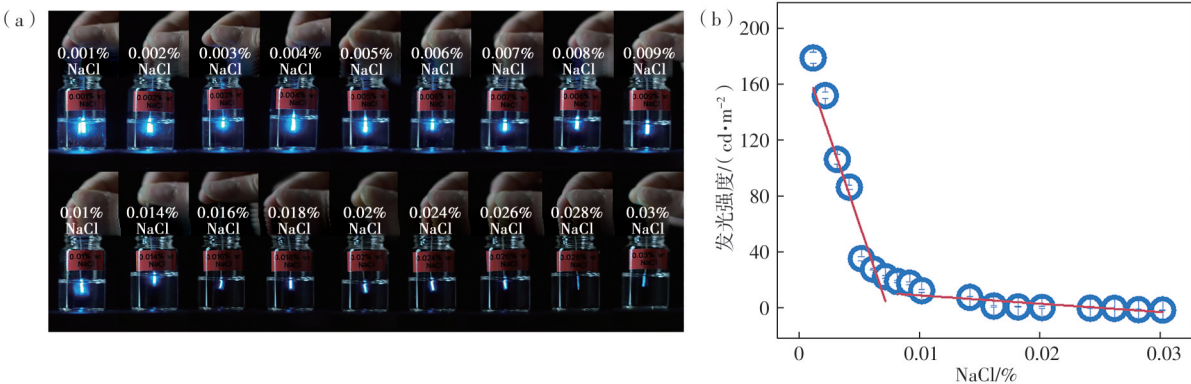


图 4 电致发光纤维的可视化传感应用。(a)不同浓度盐溶液发光实物图;(b)不同浓度盐溶液发光强度
Fig. 4 Visualization sensing applications of electroluminescent fiber. (a)Luminescent physical diagram of salt solutions with different concentrations. (b)Luminescence intensity of salt solution with different concentration

3.5 单电极电致发光纤维织物应用

近年来,发光纺织品随着智能纺织品发展而备受关注^[37-38]。智能发光纺织品能够通过可视化的方式感知并响应外界环境变化。图 5(b)的织物是用吸湿性较好的棉线作为经线,单电极发光纤维作为纬线,用图 5(a)的织布机编织成了 10 cm×10 cm 的布,放大后为图 5(c)所示的蜂窝

组织纹理。透气性对电子纺织品的舒适性有重大影响,蜂窝织物由于其凹凸和多孔结构而具有较好的透气性,相比于斜纹和平纹织物,其透气性最好。图 5(d)为透气性测试结果,在 0 ~ 100 Pa 的压力下,其透气效果远比市面上的商用布料好,这保证了发光织物穿戴在人身上的透气效果。图 5(e)为织物的力学测试,在同一拉伸应

变为85%时,发光纤维拉伸应力为0.43 MPa,而商用棉布为0.13 MPa,可发现其力学性能也较商用的普通面料好,耐拉扯,保证了服役性能。

图5(f)为织物在质量分数0.01%氯化钠溶液中的发光效果,如图5(g)所示,发光织物可感知氯化钠浓度大小的变化,浓度越低,其发光强度越高。

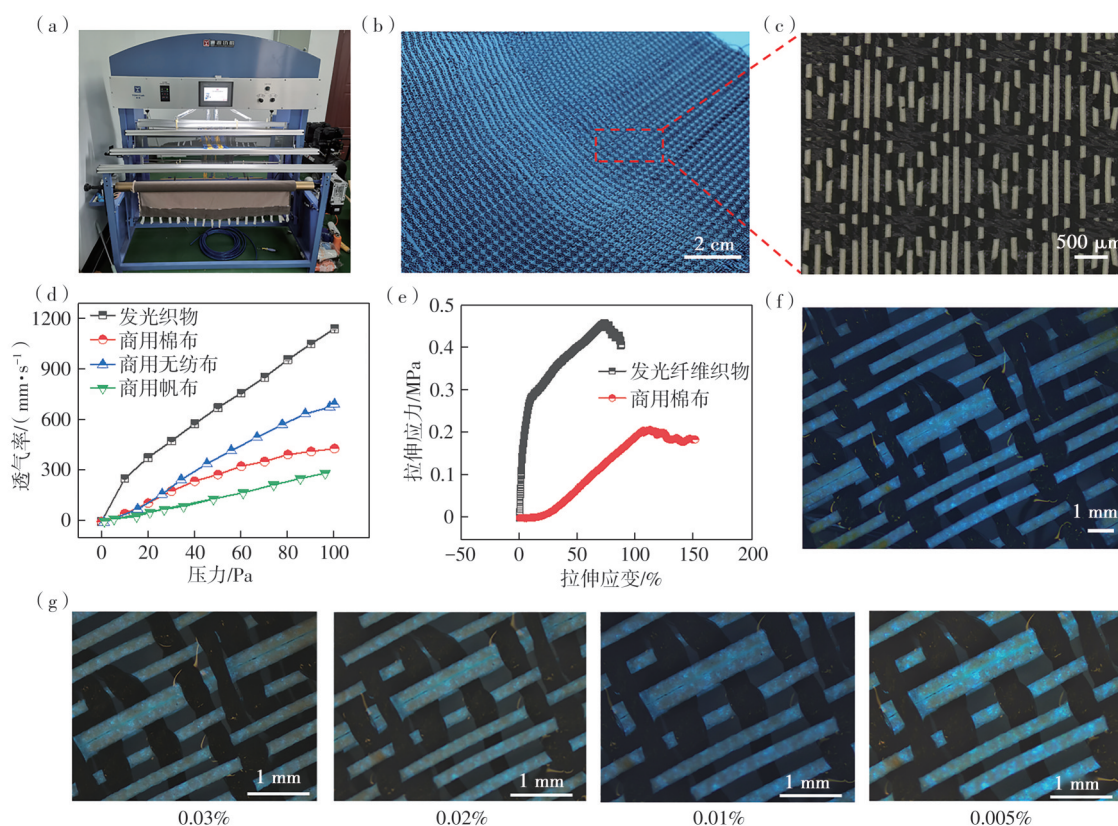


图5 电致发光纤维织物的编制及表征。(a)编制过程;(b)织物宏观实物图;(c)织物放大实物图;(d)织物透气性测试;(e)织物力学测试;(f)织物在水中的发光实物图;(g)织物在不同浓度氯化钠溶液中的发光实物图

Fig.5 Fabrication and characterization of electroluminescent fiber fabric. (a)Compilation process. (b)Macroscopic physical diagram of fabric. (c)Enlarged physical diagram of fabric. (d)Breathability test of fabric. (e)Mechanical test of fabric. (f) Luminescent physical diagram of fabric in water. (g) Luminescence of fabric in different concentrations of sodium chloride solution

4 结 论

本文采用一种简单、可扩展且成本低廉的制造技术,连续生产了超过100 m长度的单电极电致发光光纤。该光纤由导电层、介质层和发光层组成。在无线电场激励下,该光纤能够发出波长为456 nm的光,并能在水和氯化钠溶液中稳定发光。本研究将其应用于可视化传感领域,通过观察发光强度的变化来直观判断氯化钠的浓度,对汗液分析和生物学研究具有重要的应用价值。该光纤对氯化钠浓

度的识别精度可达到0.001%,并且在不同的电压和频率条件下显示出很好的灵敏度。此外,该光纤具备良好的柔韧性和机械性能,能够编织成具有高透气性和优越机械特性的发光织物。其在氯化钠浓度可视化识别方面的功能,预示着其在可穿戴可视化汗液传感器领域具有巨大的应用潜力。

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.20240067>.

参 考 文 献:

- [1] BROTHERS M C, DEBROSSE M, GRIGSBY C C, *et al.* Achievements and challenges for real-time sensing of analytes in sweat within wearable platforms [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2019, 52(2): 297-306.

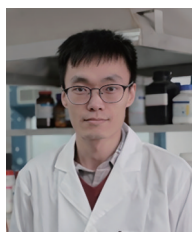
- [2] CHEN X Q, WAN H, GUO R, *et al.* A double-layered liquid metal-based electrochemical sensing system on fabric as a wearable detector for glucose in sweat [J]. *Microsyst. Nanoeng.*, 2022, 8: 48.
- [3] HUANG X C, LIU Y M, ZHOU J K, *et al.* Garment embedded sweat-activated batteries in wearable electronics for continuous sweat monitoring [J]. *npj Flex. Electron.*, 2022, 6(1): 10.
- [4] KIM E H, HAN H, YU S, *et al.* Interactive skin display with epidermal stimuli electrode [J]. *Adv. Sci.*, 2019, 6(13): 1802351.
- [5] WANG J X, YAN C Y, CHEE K J, *et al.* Highly stretchable and self-deformable alternating current electroluminescent devices [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(18): 2876-2882.
- [6] 黄启章, 孙思琦, 刘铭泽, 等. 面向显示应用的胶体量子点电致发光二极管: 进展与挑战 [J]. *发光学报*, 2023, 44(5): 739-758.
- HUANG Q Z, SUN S Q, LIU M Z, *et al.* Colloidal quantum dot electroluminescent diodes for display applications: progress and challenges [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(5): 739-758. (in Chinese)
- [7] CHO S, CHANG T, YU T H, *et al.* Smart electronic textiles for wearable sensing and display [J]. *Biosensors*, 2022, 12(4): 222.
- [8] SHI X, ZUO Y, ZHAI P, *et al.* Large-area display textiles integrated with functional systems [J]. *Nature*, 2021, 591(7849): 240-245.
- [9] NASRELDIN M, DE MULATIER S, DELATTRE R, *et al.* Flexible and stretchable microbatteries for wearable technologies [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2020, 5(12): 2000412.
- [10] KOO J H, KIM D C, SHIM H J, *et al.* Flexible and stretchable smart display: materials, fabrication, device design, and system integration [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28(35): 1801834.
- [11] FENG Y Y, WANG Y X, YING Y B. Structural design of metal-organic frameworks with tunable colorimetric responses for visual sensing applications [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2021, 446: 214102.
- [12] ZUO Y, SHI X, ZHOU X F, *et al.* Flexible color-tunable electroluminescent devices by designing dielectric-distinguishing double-stacked emissive layers [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(50): 2005200.
- [13] YANG W F, GONG W, GU W, *et al.* Self-powered interactive fiber electronics with visual-digital synergies [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(45): 2104681.
- [14] TAM T V, HUR S H, CHUNG J S, *et al.* Novel paper- and fiber optic-based fluorescent sensor for glucose detection using aniline-functionalized graphene quantum dots [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2021, 329: 129250.
- [15] TIAN Y, HE X L, LI L F, *et al.* Enhanced sensitivity of wired and wireless measurement for liquid concentration based on a modified cylindrical cavity [J]. *IEEE Sens. J.*, 2023, 23(17): 19457-19465.
- [16] CARBONE P, DIONIGI M, DE ANGELIS A, *et al.* One-bit measurements in microwave resonators [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2024, 73: 6001007.
- [17] GONG W, HOU C Y, ZHOU J, *et al.* Continuous and scalable manufacture of amphibious energy yarns and textiles [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 868.
- [18] MA L Y, WU R H, PATIL A, *et al.* Acid and alkali-resistant textile triboelectric nanogenerator as a smart protective suit for liquid energy harvesting and self-powered monitoring in high-risk environments [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(35): 2102963.
- [19] YANG W F, GONG W, HOU C Y, *et al.* All-fiber tribo-ferroelectric synergistic electronics with high thermal-moisture stability and comfortability [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1): 5541.
- [20] JEONG S M, SONG S, SEO H J, *et al.* Battery-free, human-motion-powered light-emitting fabric: mechanoluminescent textile [J]. *Adv. Sustain. Syst.*, 2017, 1(12): 1700126.
- [21] 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)
- [22] 战胜, 刘佳田, 张汉壮, 等. 基于无机电荷产生层的量子点电致发光器件 [J]. *发光学报*, 2022, 43(10): 1469-1477.
- ZHAN S, LIU J T, ZHANG H Z, *et al.* Quantum-dot light-emitting diodes based on inorganic charge-generation layer

- [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(10): 1469-1477. (in Chinese)
- [23] 王玥, 杨伟峰, 陈浩廷, 等. 高性能 ZnS:Cu 基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 mechanoluminescent elastomers and their applications in visually interactive fabrics [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(10): 1609-1619. (in Chinese)
- [24] TIWARI S, TIWARI S, CHANDRA B P. Characteristics of a. c. electroluminescence in thin film ZnS:Mn display devices [J]. *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.*, 2004, 15(9): 569-574.
- [25] 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.
- [26] ZHANG X, WANG F. Recent advances in flexible alternating current electroluminescent devices [J]. *APL Mater.*, 2021, 9(3): 030701.
- [27] 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.
- [28] SONNER Z, WILDER E, HEIKENFELD J, *et al.* The microfluidics of the eccrine sweat gland, including biomarker partitioning, transport, and biosensing implications [J]. *Biomicrofluidics*, 2015, 9(3): 031301.
- [29] LIEBERMAN J. Cyclic fluctuation of sweat electrolytes in women: effect of polythiazide upon sweat electrolytes [J]. *JAMA*, 1966, 195(8): 629-635.
- [30] POSSANZINI L, DECATALDO F, MARIANI F, *et al.* Textile sensors platform for the selective and simultaneous detection of chloride ion and pH in sweat [J]. *Sci. Rep.*, 2020, 10(1): 17180.
- [31] GAO F P, LIU C X, ZHANG L C, *et al.* Wearable and flexible electrochemical sensors for sweat analysis: a review [J]. *Microsyst. Nanoeng.*, 2023, 9: 1.
- [32] KIM M J, SHIN D W, KIM J Y, *et al.* The production of a flexible electroluminescent device on polyethylene terephthalate films using transparent conducting carbon nanotube electrode [J]. *Carbon*, 2009, 47(15): 3461-3465.
- [33] WANG Z G, CHEN Y F, LI P J, *et al.* Flexible graphene-based electroluminescent devices [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(9): 7149-7154.
- [34] ZHOU Y L, CAO S T, WANG J, *et al.* Bright stretchable electroluminescent devices based on silver nanowire electrodes and high-k thermoplastic elastomers [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(51): 44760-44767.
- [35] LEE YRIM, AN J, KIM HSOO, *et al.* Electroluminescent soft elastomer actuators with adjustable luminance and strain [J]. *Soft Matter*, 2019, 15(40): 7996-8000.
- [36] HU D, XU X R, MIAO J S, *et al.* A stretchable alternating current electroluminescent fiber [J]. *Materials*, 2018, 11(2): 184.
- [37] WU Y Y, MECHAEL S S, CHEN Y T, *et al.* Solution deposition of conformal gold coatings on knitted fabric for E-textiles and electroluminescent clothing [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2018, 3(3): 1700292.
- [38] REIN M, FAVROD V D, HOU C, *et al.* Diode fibres for fabric-based optical communications [J]. *Nature*, 2018, 560(7717): 214-218.



杨小锐(1999-),女,山西太原人,硕士研究生,2021年于河北师范大学获得学士学位,主要从事智能可穿戴材料的研究。

E-mail: 2210314@mail.dhu.edu.cn



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