

文章编号: 1000-7032(2024)11-1758-09

光与材料的交响:硫化锌基场致发光纤维

常博雅¹, 郭素文², 郑 岩³, 李克睿¹, 李耀刚¹,
张青红¹, 王宏志¹, 侯成义^{1*}

(1. 东华大学 纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620;

2. 上海洞舟实业有限公司, 上海 201619;

3. 上海科润光电技术有限公司, 上海 201100)

摘要: 近年来,场致发光(EL)技术在智能可穿戴设备和视觉交互传感领域的应用引起了业界的极大兴趣。硫化锌(ZnS)基场致发光器件因其优良的发光性能、高稳定性和耐久性,已经成为众多应用场景和可视化交互平台的焦点。本文系统回顾了硫化锌基场致发光材料的性能,深入探讨了其发光机制、器件设计和应用研究,着重分析了硫化锌基场致发光纤维的最新研究动态,揭示了其在未来发展中的潜力与挑战。

关键词: 场致发光纤维; 柔性; 显示; 智能可穿戴

中图分类号: TN383

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240190

Light and Materials: Zinc Sulfide-based Field-induced Luminescent Fibers

CHANG Boya¹, GUO Suwen², ZHENG Yan³, LI Kerui¹, LI Yaogang¹, ZHANG Qinghong¹,
WANG Hongzhi¹, HOU Chengyi^{1*}

(1. State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Material, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Dongzhou Industrial Co., Ltd., Shanghai 201619, China;

3. Shanghai Kerune Phosphor Technology Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

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

Abstract: In recent years, field luminescence (EL) technology has gained significant attention in the development of smart wearable devices and visual interaction sensing systems. Zinc sulfide (ZnS)-based field-emitting devices have emerged as key components in various application scenarios and visual interaction platforms due to their superior luminescence performance, high stability, and durability. This paper systematically reviews the properties of ZnS-based field-emission materials, with a comprehensive discussion of their luminescence mechanisms, device designs, and research applications. Particular attention is devoted to the latest advancements in ZnS-based field-emission fibers, highlighting their potential and challenges for future development.

Key words: field emitting fibers; flexible; display; smart wearable

1 引言

随着科技的飞速发展,场致发光技术已成为柔性显示和智能传感领域的研究热点,其在可视

化信息交互方面展现出巨大的潜力。场致发光是一种特殊的电致发光现象,通过外部电场激发发光材料内部的电子和空穴复合发射光子,或者电子获得能量从基态被激发到更高的能态,从而实

收稿日期: 2024-08-13; 修订日期: 2024-08-26

基金项目: 上海市松江区产学研合作研究项目(SJCXY2024-01)

Supported by Shanghai Songjiang District Enterprise Industry University Research Cooperation Project(SJCXY2024-01)

现发光^[1]。1935年, Destriau 通过将硫化锌(ZnS)荧光粉浸入蓖麻油中并施加强交变电场, 成功地使荧光粉发出明亮的光^[2]。1955年, Wolff 在磷化镓(GaP)上观察到了Ⅲ-V族半导体发出的可见光^[3]。我国在电致发光领域的研究始于20世纪50年代, 最初由中国科学院物理研究所和中国科学院长春物理研究所(现中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)开展。此后, 发光材料和器件得到了持续优化, 研究重点逐渐转移到发光效果、使用寿命、发光稳定性以及多色发光等关键性能上^[4-6]。

随着对场致发光材料研究的深入, 硫化锌逐渐成为该领域的研究热点, 凭借其高化学稳定性、环境适用性、制备工艺简单和发光亮度高等优点而受到广泛关注。硫化锌是一种具有较大禁带宽度的半导体材料, 通过不同的元素掺杂, 可以实现从蓝光到绿光、黄光乃至红光的多色发光, 展现出卓越的颜色调控能力。此外, ZnS材料因其较高的稳定性, 在一定温度和湿度条件下能够维持长期的发光性能, 因此在长期工作的发光器件中受到了广泛关注。然而, 硫化锌场致发光材料的应用仍面临挑战。首先, 尽管ZnS材料的发光效率有所提升, 但与新型半导体材料(例如有机电致发光材料和量子点)相比, 其性能仍有待增强^[7]。其次, 为了适应柔性可穿戴器件的应用需求, 基于ZnS的场致发光材料的发光驱动电压需进一步降低。解决这些技术难题将显著扩展硫化锌材料的应用范围。

因此, 硫化锌基场致发光器件的开发已成为近年来的研究重点, 尤其是将其应用于智能可穿戴视觉交互方面^[8-10]。传统的显示器如液晶显示器和有机发光二极管, 通常依赖于氧化铟锡(ITO)玻璃等刚性基板, 因而限制了其弯曲和拉伸能力。尽管柔性发光二极管显示器的研究已取得进展, 但对于需要承受大幅应变的应用场景, 它们仍存在局限性。柔性场致发光薄膜器件展示出优异的变形能力, 能够在拉伸、弯曲、折叠、甚至部分损坏的情况下保持稳定运行, 但仍存在模量不匹配和透气透湿性差等问题^[11-14]。而基于柔性纤维的电子纺织品则能以更灵活多样的方式与可穿戴智能交互系统集成, 展现出更优的可穿戴性。本文对硫化锌基场致发光材料的发展历程、发光原理、器件结构

进行了综述, 总结了基于该材料制备的发光纤维在照明、显示和可穿戴领域的应用研究, 最后探讨并展望了基于硫化锌场致发光纤维的未来应用前景和技术挑战。

2 硫化锌基场致发光原理

场致发光器件在高交流电压作用下, 电子获得高能并转化为热电子, 随后通过碰撞等动力学过程激发发光。图1阐释了场致发光器件的详细机理^[3]。(1)电子隧穿与发射: 在高电场作用下, 电子通过隧穿效应从绝缘层与荧光层的界面态发射。该界面态是两种不同材料的过渡区域。(2)电子加速: 电子发射后将在导带中沿电场方向加速移动。(3)碰撞激发与电离: 当加速电子与发光中心相遇, 可通过激发性碰撞将能量转移给杂质离子, 使其激发; 或通过电离性碰撞, 产生自由电子和正离子。(4)发光: 激发态的电子最终回落至基态, 并伴随光能的辐射。

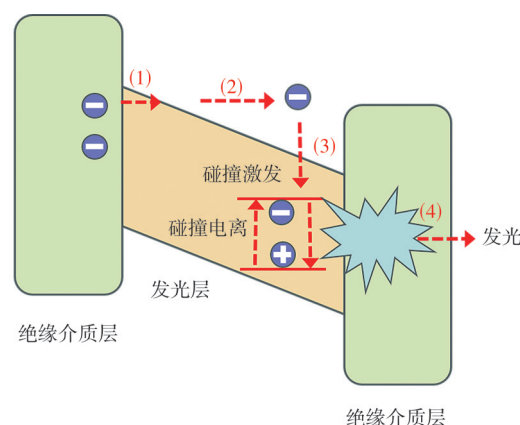


图1 场致发光器件的发光机制^[20]

Fig. 1 Luminescence mechanism of field emitting devices^[20]

场致发光器件的发光层是由掺杂金属的硫化锌荧光粉均匀分散在电介质中构成的。荧光粉的发光颜色受基体材料、晶格结构、杂质元素及掺杂比例等的影响, 从而实现多样化的发光效果。ZnS因其卓越的化学稳定性而广泛用作基质材料。在ZnS基体中掺杂铝(Al)、铜(Cu)、锰(Mn)、银(Ag)等元素, 可以产生多种颜色的光。图2(a)阐释了ZnS:Mn荧光粉的黄光发射机理, 其归因于 Mn^{2+} 的 $4T_1-6A_1$ 的电子态跃迁, 在ZnS基体中, 由于ZnS的s-p电子态和 Mn^{2+} 的d能级之间的强相互作用, 导致在585 nm处出现发射峰。Zn²⁺(半径为0.74 nm)和 Mn^{2+} (半径为0.8 nm)的离子半径非常接近, Mn^{2+} 能够替代Zn²⁺在晶体结构中的

位置,并以四面体配位方式结合^[15]。

ZnS:Cu 荧光粉的发射范围覆盖从蓝色到绿色,这归因于其复杂的多电子跃迁机制。在 ZnS:Cu 荧光粉的合成过程中,过量的铜会在 ZnS 晶体基体中形成 Cu_{2-x}S 的细针状结构。该结构作为 p 型半导体,在 ZnS 基质内形成异质结。在高电场作用下, Cu_{2-x}S 的顶端局部电场增强^[15-16],促进电子和空穴从 Cu_{2-x}S 的两端隧穿至 ZnS 晶格(见图 2(b))。随后,电子被受体位点所捕获,而空穴则被供体位点所捕获。当电场方向改变时,被捕获的电子和空穴重新结合,引发光发射。

驱动频率对 ZnS:Cu 荧光粉的发射波长也存

在影响。在低频下,主要产生绿色发射,而在高频电场作用下,则主要显示蓝色^[17-19]。此外,通过调控 ZnS 荧光粉和钙钛矿纳米颗粒的比例,可以实现发光颜色从蓝色到深红色的转变。例如,2018 年,王锋团队成功开发了一种颜色可调的发光材料^[19](见图 2(c))。在交流电场作用下,ZnS 产生的激发能量通过重吸收和福斯特共振能量转移机制被钙钛矿纳米颗粒所捕获,从而实现高色纯度和波长可调的光输出。这种基于钙钛矿和硫化锌掺杂的交流电致发光器件具有出色的可拉伸性、低功耗和高亮度,其发光亮度超过 500 cd/m^2 。

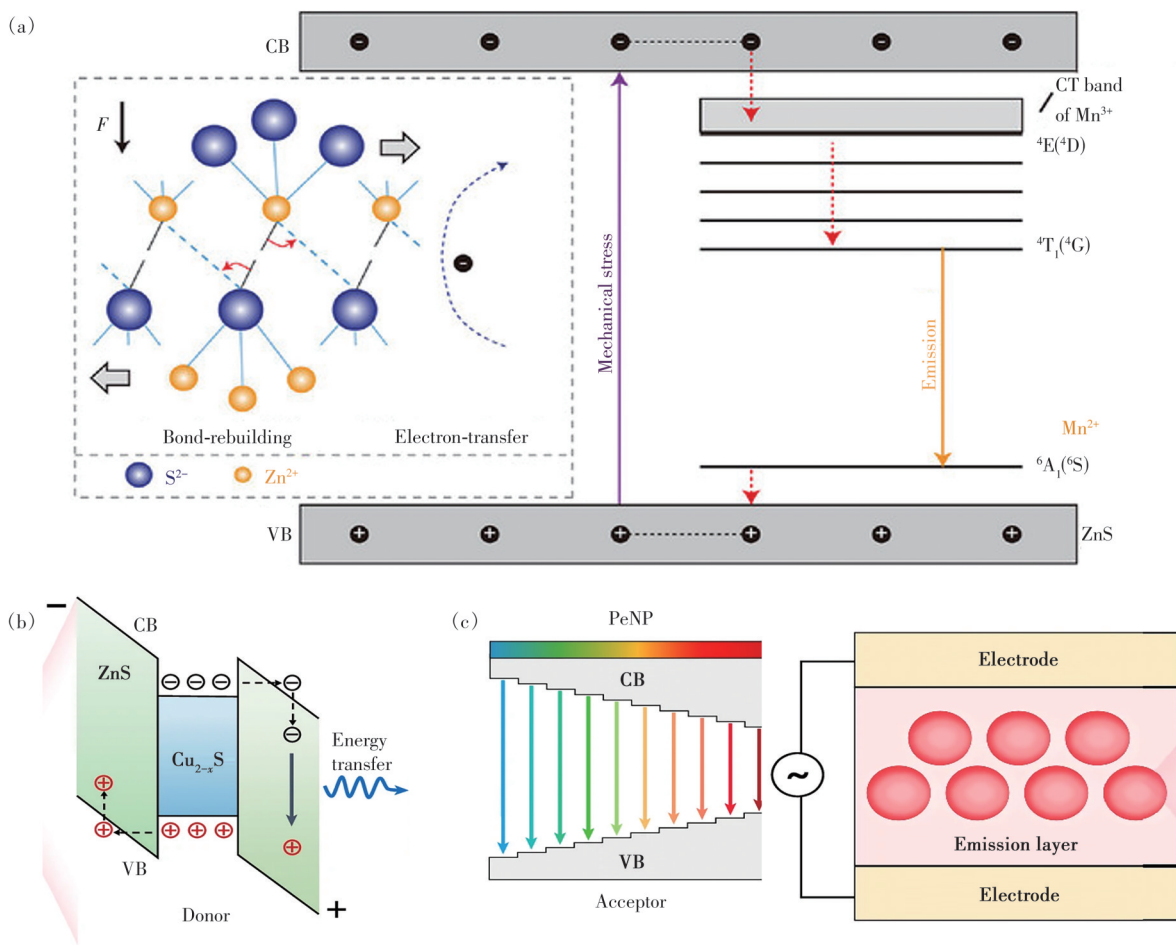


图 2 硫化锌类发光粉。(a) ZnS:Mn 的发光机制^[15];(b) ZnS:Cu 纳米颗粒的发光机制^[19];(c) 钙钛矿掺杂硫化锌的材料设计示意图^[19]

Fig. 2 Zinc sulfide-based luminescent powder. (a) Luminescence mechanism of ZnS: Mn^[15]. (b) Luminescence mechanism of ZnS: Cu nanoparticles^[19]. (c) Schematic material design of chalcocite doped zinc sulphide^[19]

3 硫化锌基场致发光器件结构

场致发光器件是由发射层和电极层组成的。发射层通常由发光材料构成,其中无机多晶固体粉末因其成本效益高且适合大规模生产而成为主

流选择。该发射层夹在两个电极之间,这些电极需具备优异的导电性和良好的光透过率^[20]。场致发光器件根据层数的不同,可分为单层、双层和多层结构。Vlasenko 和 Popkov 于 1960 年提出了首个单层电致发光器件(图 3(a)),该器件采用 ZnS

作为发射层,但存在工作电压高和稳定性不足的问题^[21]。双层电致发光器件(图 3(b))通过引入绝缘层来保护发射层,有效解决了这些问题。尽管双层结构在性能上有所提升,但其长期稳定性仍有待提高。多层电致发光器件(图 3(c))通过增加辅助层以促进电荷载流子的注入,进一步提升了器件性能。这些辅助层包括空穴注入层、空穴传输层、空穴阻挡层、电子传输层和电子注入层等,它们通过能量转移机制提高效率。为了满足人们对可穿戴电子设备的需求,研究重点正逐步

从传统平面器件转向具备更高柔性和可拉伸性的纤维状场致发光器件^[22-24]。2020 年,锁志刚团队制备了一种离子型电致发光纤维,实现了可拉伸、可循环并具备显示功能的纺织品^[16]。如图 3(d)所示,当电源在水凝胶芯层和外部水凝胶层之间施加交流电压时,极性相反的离子会周期性地在水凝胶/弹性体界面上积聚,在发光层中产生电场,并在荧光粉颗粒中生成电子-空穴对。荧光粉颗粒分散在介电弹性体中,因此电子和空穴不会从荧光粉颗粒中迁移出来,而是重新组合并发光。

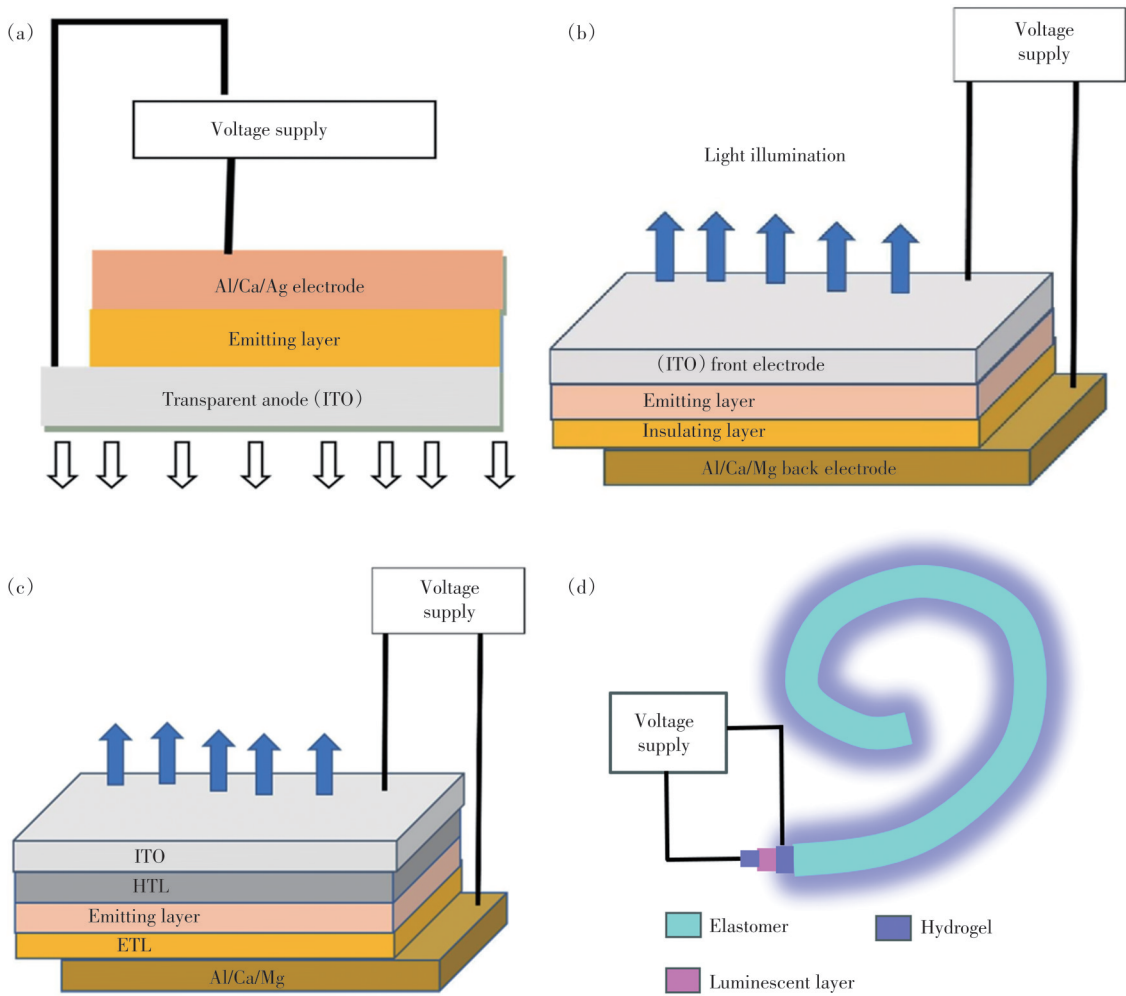


图 3 场致发光器件结构。(a)单层场致发光器件^[20];(b)双层场致发光器件^[20];(c)多层电致发光器件^[20];(d)纤维状发光器件^[16]

Fig. 3 Structure of field-emitting devices. (a)Single-layer field-emitting device^[20]. (b)Double-layer field-emitting device^[20]. (c)Multilayer electroluminescent device^[20]. (d)Fiber-based light-emitting devices^[16]

4 硫化锌基场致发光纤维的应用

人机交互技术是可穿戴应用设计的关键研究方向之一,而场致发光器件作为该领域内的一种视觉交互技术,展现出重要的应用价值。基于硫化锌的场致发光器件因其出色的发光性能和高稳

定性,随着不断的创新和改进,在产业化、多功能化和可穿戴化方面取得了显著进展。然而,传统的硫化锌基薄膜场致发光器件由于其硬度较大、透气性差和集成度低等局限性,难以完全满足可穿戴设备对灵活性和舒适性的要求^[25-26]。相比之

下,基于硫化锌的场致发光纤维凭借其良好的透气性、可拉伸、可弯曲,并且能贴合身体轮廓,易于与织物及其他柔性可穿戴设备集成,从而展现出巨大的显示应用潜力。

4.1 显示

硫化锌基场致发光纤维因其高分辨率显示能力、良好的颜色调控和耐弯折性,在显示应用领域展现出独特的优势,其应用范围从时装设计至建筑发光标识,呈现出多样化的应用场景^[27-29]。

硫化锌基场致发光纤维的引入为时尚设计带来了前所未有的创新元素(见图4)。传统服装设计主要依赖于面料的纹理、色彩和剪裁技术,而发光纤维的应用则为服装设计增添了全新的表达维度。设计师通过将发光纤维整合到服装中,可以

利用光效创造出独特的视觉效果,赋予时装炫目且充满未来感的美学特质。硫化锌基发光纤维不仅亮度高,还具有较长的发光寿命,确保服装在长时间反复弯曲后仍能保持良好的光效。在设备配件设计中,发光纤维可作为耳机线或眼镜的装饰元素,提升产品的美观性和操作便利性。此外,场致发光纤维在建筑照明中也展现出其在功能性与美观性之间的平衡。在建筑外墙、地标建筑轮廓或大型显示屏中,发光纤维通过昼夜光效转换,赋予建筑“动态表情”。这种动态照明不仅提升了建筑物的视觉识别度,还能与周围环境互动,增强建筑物在夜间的视觉冲击力。

场致发光纤维在日常生活中有着广泛的应用场景,为各种场景带来了新颖的光效和视觉体验。

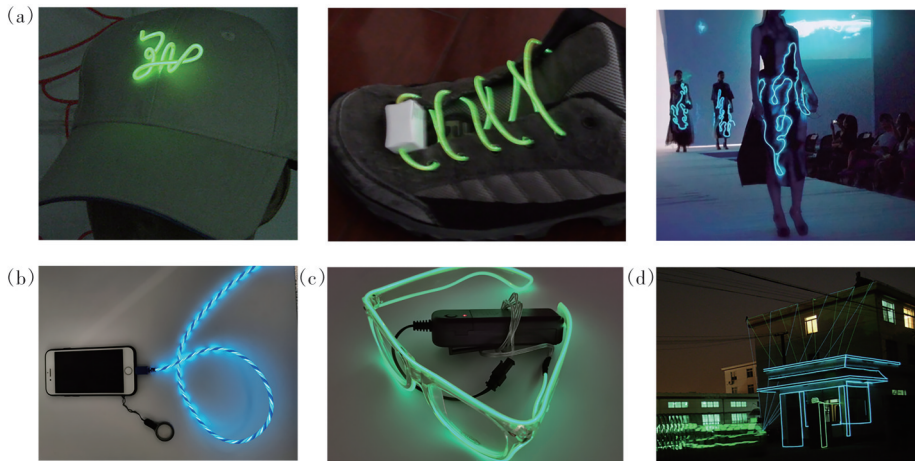


图4 硫化锌场致发光纤维应用于显示器件(图片提供:上海洞舟实业有限公司)。(a)时装设计中的发光纤维;(b)手机发光线;(c)眼镜发光装饰;(d)室内装饰及建筑发光显示

Fig. 4 Zinc sulfide field luminescent fibers applied to display devices (Photo courtesy: Shanghai Dongzhou Industrial Company Limited). (a) Luminescent fibers in fashion design. (b) Cell phone luminescent lines. (c) Eyeglasses luminescent decoration. (d) Interior decoration and architectural luminescent displays

4.2 照明

得益于硫化锌基场致发光纤维的高发光效率、良好耐水洗性、环境稳定性和长期使用寿命等优点,其已成为水下照明、消防救援照明以及恶劣环境下建筑停电照明指示等应用的理想选择^[30]。

如图5所示,硫化锌基场致发光纤维在水下照明中展现了显著的应用潜力,能够在复杂的水下环境中实现持续稳定的发光效果。在水族馆中,该纤维可用于水下建筑的照明装置,提供均匀的光照。在紧急救援和灾难应急场景中,场致发光纤维也发挥着不可替代的作用。其低功耗和长寿命特性使其成为应急照明的理想选择。在水下环境中,救援常常面临能见度低和光源缺乏的挑

战。场致发光纤维能在有限的光照条件下辅助救援人员迅速定位安全通道和避难所,为被困人员提供清晰的指引,显著提升救援效率与成功率。在现代建筑设计中,应急照明和疏散标识系统对于人员的安全疏散至关重要,尤其是在火灾、地震或停电等紧急情况下,传统照明系统可能因电力中断而失效。硫化锌基场致发光纤维凭借其低能耗特性,可通过自发电系统持续工作,为建筑物内部提供稳定的照明支持。

总之,硫化锌基场致发光纤维在水下照明、紧急救援和建筑安全疏散等多个领域均显示出显著的应用潜力。其优势不仅在于出色的耐久性、低能耗性,而且其灵活性和易于安装的特性确保了



图 5 硫化锌场致发光纤维应用于照明器件(图片提供:上海科润光电技术有限公司)。(a)水下照明;(b)消防照明;(c)恶劣环境下的照明指示标识

Fig. 5 Zinc sulfide field luminescent fibers applied to lighting devices (Photo courtesy: Shanghai Kerun Optoelectronics Technology Company Limited). (a) Underwater lighting. (b) Fire-fighting lighting. (c) Illuminated indicator signs in harsh environments

其在多样化的应用场景中的有效性和实用性。

4.3 智能可穿戴

硫化锌基场致发光纤维凭借其柔软、轻便和可编织的特性,能够与多种纺织材料结合,提供更加灵活且舒适的穿戴体验。此外,硫化锌材料的属性赋予了其发光均匀、环境适应性强和快速响应等优势,使其在智能可穿戴设备的照明、显示和传感等领域展现出广阔的应用前景^[31-34]。

近年来,场致发光纤维在智能可穿戴领域已经成为了研究的热点。2021年,本课题组制备了一种新型智能交互纤维电子器件,该器件能够实现可视化与数字化的协同效应(见图 6(a)、(b))^[35]。该器件无需外部电源,通过空间和表面电荷极化耦合,形成了一种新型的机械发光(ML)-摩擦电协同效应,显著提升了电输出(100%)和光输出(30%),并引入了一种高时空分辨率的运动捕捉模式。基于创新的热塑性 ML 材料系统和纺丝工艺,我们实现了发光纤维的工业级连续制造与回收流程。其材料设计与纺丝工艺成功结合了机械发光和摩擦电效应,为纤维传感技术的发展提供了新的可能性。特别是在自供电方面的创新,使该器件在能源效率和环境适应性方面展现出显著优势,有效克服了传统可穿戴设备对外部电源的依赖问题。由于该纤维电子器件具有出色的弹性和耐久性,可量产、可编织、可洗涤,因此人机界面、虚拟现实、水下传感、救援和

信息交互等领域具有良好的应用前景。

2024年,本课题组提出了基于“人体耦合”的能量交互机制,并成功研发出集无线能量采集、信息感知与传输等功能于一体的新型智能纤维(图 6(c)、(d))^[36]。该智能纤维编织而成的纺织品,无需依赖芯片和电池,即可实现发光显示和触控等人机交互功能。与空气($\epsilon \approx 1, \delta \approx 10^{-14}$ S/m)相比,人体具有非常高的相对介电常数和电导率($\epsilon \approx 78, \delta \approx 0.6$ S/m),是理想的耦合电磁能量的载体。环境中耗散的电磁能量(如智能手机、电力电缆、织物摩擦等)可以在纤维、人体以及大地之间形成闭合能量回路,这意味着在环境中自由耗散的电磁能量可通过耦合路径、人体路径和返回路径被有效收集。当纤维与人体接触时,在皮肤-纤维之间会形成界面耦合极化电容,发射源、纤维、人体及大地之间形成了一个交流的回路,使部分环境中的电磁能量能在回路中发生振荡,从而激发光学活性层产生可见光。除发光应用之外,我们还开发了交互式智能织物系统,实现了对虚拟游戏的实时控制。当界面极化电容的电场强度超过空气击穿阈值($\sim 3 \times 10^{-3}$ V/ μm)时,将引发局部等离子体放电效应,产生额外电位移项,打破电荷对平衡状态,实现触觉传感电信号的无线传输。这种新型纤维可广泛应用于服装、布艺装饰等日常纺织品中,通过与人体接触实现可视化的传感、交互,甚至提供高亮度照明。同时,它还能捕捉人体

不同姿态动作产生无线信号,进而对智能家电等电子产品进行无线遥控。这些新颖的功能有望拓

展电子产品的应用场景,甚至改变人们智慧生活的方式。

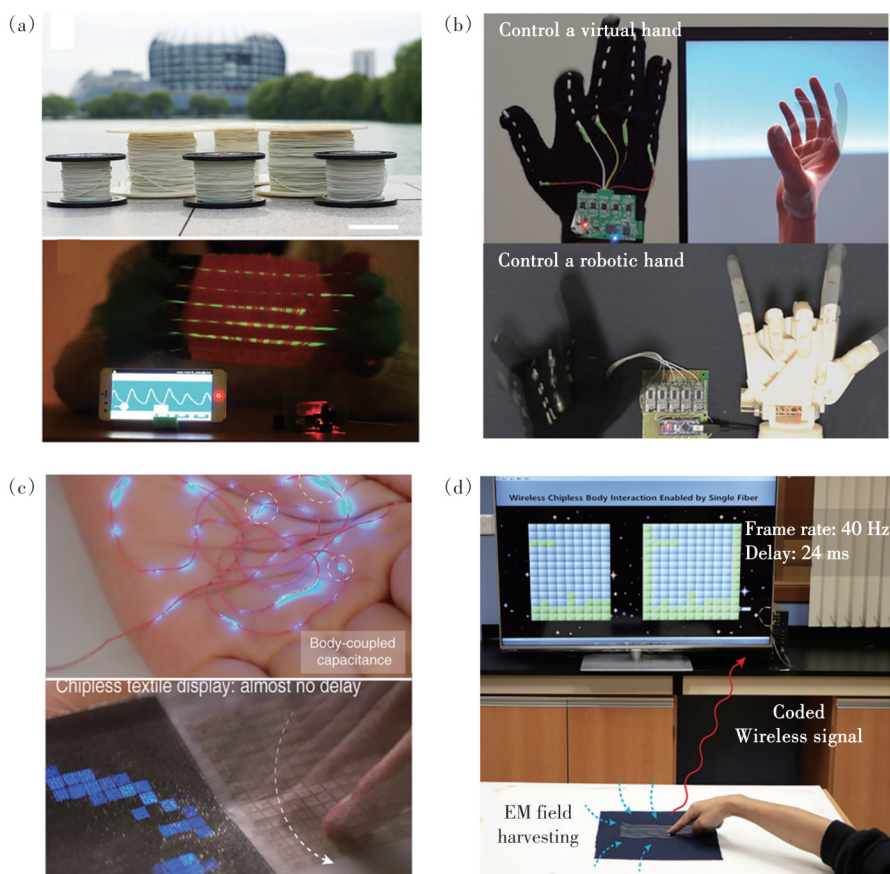


图 6 硫化锌场致发光纤维应用于智能可穿戴。(a)~(b)视觉-数字协同作用的自供电交互式发光纤维^[35];(c)~(d)无芯片人体耦合作用的无线能量交互发光纤维^[36]

Fig. 6 Zinc sulfide field-emitting fibers for smart wearable applications. (a)–(b) Self-powered interactive luminescent fibers with visual-digital synergy^[35]. (c)–(d) Wireless energy-interactive luminescent fibers without chip human coupling^[36]

5 总结与展望

硫化锌基场致发光纤维因其出色的发光性能、良好的环境稳定性和长期耐用性等,已在光电子器件、消防救援照明及智能可穿戴技术等多个领域展现出广阔的应用空间^[37]。随着科技的进步,硫化锌基发光纤维的特性为未来的应用提供了更多可能性。例如,在医疗健康监测方面,硫化锌基发光纤维可通过检测氯化钠溶液的浓度变化实现发光亮度的调节,其发光强度会随着溶液浓度的增加而降低^[38],这一特性为通过汗液中的离子浓度监测人体的代谢状态提供了新途径。此外,在甲醛气体检测方面,可利用纳米材料作为化学发光传感器,当空气中的甲醛在一定温度下被氧化时,在传感纳米材料表面可观察到一定波长的发光强度^[39],这一技术为实时检测空气中的有毒气体提供了新的检测手段。

尽管硫化锌基场致发光纤维展现了广泛的应用前景,但其实际应用中仍面临诸多挑战。硫化锌材料需要在高交流电压下驱动以实现高效发光,这在贴身穿戴的智能设备中存在潜在的安全隐患。与有机发光二极管等器件相比,其在发光强度方面仍有提升空间。为了克服这些技术挑战,研究者可以通过优化发光材料的晶体结构、改进器件构架和改善电场分布,以实现在较低电压下低能耗的高效发光。未来,硫化锌场致发光纤维的发展方向应聚焦于综合性能的提升,整合发光、传感及环境监测等多功能,成为集显示与感知功能于一体的智能材料,为柔性电子设备的设计提供新的场景和思路。

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.20240190>

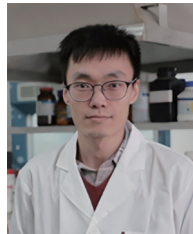
参 考 文 献:

- [1] WANG L, XIAO L, GU H S, *et al.* Advances in alternating current electroluminescent devices [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, 7(7): 1801154.
- [2] WANG J X, LEE P S. Progress and prospects in stretchable electroluminescent devices [J]. *Nanophotonics*, 2017, 6(2): 435-451.
- [3] LIU Y B, XU M L, LONG H, *et al.* Alternating current electroluminescence devices: recent advances and functional applications [J]. *Mater. Horiz.*, 2024, doi: 10.1039/D4MH00309H.
- [4] CINQUINO M, PRONTERA C T, PUGLIESE M, *et al.* Light-emitting textiles: device architectures, working principles, and applications [J]. *Micromachines*, 2021, 12(6): 652.
- [5] MA F X, LIN Y, YUAN W, *et al.* Fully printed, large-size alternating current electroluminescent device on fabric for wearable textile display [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2021, 3(4): 1747-1757.
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] GU S Q, ZHOU Y L, LI Y Y, *et al.* Ultrastretchable alternating current electroluminescent panels for arbitrary luminous patterns [J]. *Appl. Mater. Today*, 2023, 31: 101764.
- [9] WANG V, ZHAO Y B, JAVEY A. Performance limits of an alternating current electroluminescent device [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(2): 2005635.
- [10] 王玥, 杨伟峰, 陈浩廷, 等. 高性能 ZnS:Cu 基场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)
- [11] JAYATHILAKA W A D M, CHINNAPPAN A, JI D X, *et al.* Facile and scalable electrospun nanofiber-based alternative current electroluminescence (ACEL) device [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2021, 3(1): 267-276.
- [12] JIANG W, LEE S, ZAN G T, *et al.* Alternating current electroluminescence for human-interactive sensing displays [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(8): 2304053.
- [13] MA S W, PETER S, KITAI A H, CuO nanowire-enhanced alternating current-driven powder electroluminescent device with high performance [J]. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2020, 2(7): 1855-1860.
- [14] ZHANG S C, QU C M, XIAO Y, *et al.* Flexible alternating current electroluminescent devices integrated with high voltage triboelectric nanogenerators [J]. *Nanoscale*, 2022, 14(11): 4244-4253.
- [15] QASEM A, XIONG P X, MA Z J, *et al.* Recent advances in mechanoluminescence of doped zinc sulfides [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2021, 15(12): 2100276.
- [16] YANG C H, CHENG S B, YAO X, *et al.* Ionotronic luminescent fibers, fabrics, and other configurations [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(47): 2005545.
- [17] ESTEVES D, AKGÜL E, SANIVADA U K, *et al.* Influence of the phosphor layer composition on flexible electroluminescent device performance [J]. *Coatings*, 2024, 14(5): 554.
- [18] ZHANG X P, YE T Y, MENG X H, *et al.* Sustainable and transparent fish gelatin films for flexible electroluminescent devices [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(4): 3876 - 3884.
- [19] CHUN F J, ZHANG B B, GAO Y Y, *et al.* Multicolour stretchable perovskite electroluminescent devices for user-interactive displays [J]. *Nat. Photonics*, 2024, 18(8): 856-863.
- [20] PARK H J, KIM S, LEE J H, *et al.* Self-powered motion-driven triboelectric electroluminescence textile system [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(5): 5200-5207.

- [21] LAHARIYA V, DHOBLE S J. Development and advancement of undoped and doped zinc sulfide for phosphor application [J]. *Displays*, 2022, 74: 102186.
- [22] 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.
- [23] WANG F, GAO W L, CHEN Q L, *et al.* Mechanically modulable and human-machine interactive luminescent fiber display platforms [J], *MRS Bull.*, 2024, 49(8): 802-816.
- [24] 赵世康, 王航, 田明伟. 平行电极式电致发光纱线的构筑成型及其水上救援可穿戴应用 [J]. *现代纺织技术*, 2024, 32(4): 45-51.
- ZHAO S K, WANG H, TIAN M W. Construction molding of a parallel electrode electroluminescent yarn and its application in water rescue wearables [J]. *Adv. Text. Technol.*, 2024, 32(4): 45-51. (in Chinese)
- [25] LIANG G J, LIU Z X, MO F N, *et al.* Self-healable electroluminescent devices [J]. *Light Sci. Appl.*, 2018, 7: 102.
- [26] 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.
- [27] LEE S, CHO W S, PARK J Y, *et al.* Water washable and flexible light-emitting fibers based on electrochemiluminescent gels [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(15): 17709-17718.
- [28] PARKER M, Electroluminescent fibres for making fabrics shine [J]. *Nat. Electron.*, 2024, 7(1): 2.
- [29] ZHANG J K, BAO L K, LOU H Q, *et al.* Flexible and stretchable mechanoluminescent fiber and fabric [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017, 5(32): 8027-8032.
- [30] WEI X Y, LIU L, WANG H L, *et al.* High-intensity triboelectrification-induced electroluminescence by micro-sized contacts for self-powered display and illumination [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2018, 5(4): 1701063.
- [31] HWANG Y H, KONG S U, KIM C Y, *et al.* Organic light-emitting fibers and fabrics for truly wearable smart displays: Recent progress and future opportunities [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2022, 30(10): 727-747.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] YIN D, CHEN Z Y, JIANG N R, *et al.* Highly flexible fabric-based organic light-emitting devices for conformal wearable displays [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2020, 5(4): 1900942.
- [38] 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)
- [39] LIAO C L, SHI J F, ZHANG M, *et al.* Optical chemosensors for the gas phase detection of aldehydes: mechanism, material design, and application [J]. *Mater. Adv.*, 2021, 2(19): 6213-6245.



常博雅(1997-),女,河南周口人,博士研究生,2023年于东华大学获得硕士学位,主要从事电致发光材料的研究。
E-mail: dhuchya@163.com



侯成义(1987-),男,四川绵阳人,博士研究生,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