

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2023.03.007

柔性交流电致发光器件的光电性能优化与自供电集成研究*

林怡彬^{1**}, 陈婉翟¹, 徐锦杰¹, 江姗姗¹, 张永爱^{1,2}, 吴朝兴^{1,2},
郭太良^{1,2}, 周雄图^{1,2}

(1. 福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350108; 2. 中国福建光电信息科学与技术创新实验室, 福州 350108)

摘要: 以掺铜硫化锌(ZnS: Cu)荧光粉为发光分子, 聚二甲基硅氧烷(PDMS)和钛酸钡(BaTiO₃)为绝缘材料, 采用刮涂技术在ITO/PET电极上制备了柔性ACEL器件, 研究了复合发光层不同材料掺比、驱动电压和频率对器件光电性能的影响。结果表明, 随着荧光粉和钛酸钡含量的增加, 柔性ACEL器件的亮度增加; 当ZnS: Cu/BaTiO₃/PDMS=2: 2: 1时, 器件性能最佳, 可以达到较低的开启电压, 40 V(2 kHz)时亮度为1.16 cd/m²。最后, 将柔性ACEL与垂直接触分离式摩擦纳米发电机进行集成, TENG最大输出电压可达360 V和输出电流46 μA左右, 可以点亮柔性ACEL器件。该自供电柔性ACEL器件为穿戴显示和交互提供了一种新的方法。

关键词: 交流电致发光器件; 掺铜硫化锌; 摩擦纳米发电; 自供电

中图分类号: TN383 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)03-0226-07

Optimization of Flexible Alternating-current Electroluminescence Devices and its Integration with Self-powered Friction Nanogenerator

LIN Yibin, CHEN Wandi, XU Jinjie, JIANG Shanshan, ZHANG Yongai, WU Chaoxin, GUO Tailiang, ZHOU Xiongtu

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, CHN;
2. Fujian Science and Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350108, CHN)

Abstract: The flexible ACCEL device was fabricated on ITO/PET electrode using copper-doped zinc sulfide (ZnS: Cu) phosphor as luminescent molecule, polydimethylsiloxane (PDMS) and barium titanate (BaTiO₃) as insulating material by scraping technology. The effects of different material mixing ratio, driving voltage and frequency of composite luminescent layer on the photoelectric properties of the device were studied. The results showed that the luminance of flexible ACCEL devices in-

收稿日期: 2023-01-03

* 基金项目: 福建省自然科学基金(2021J01577); 闽都创新实验室自主部署项目(2021ZZ111 2021ZZ130)

作者简介: 林怡彬(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光电显示技术与器件方面的研究; (E-mail: 857726782@qq.com)

陈婉翟(1998—), 女, 博士研究生, 研究方向为摩擦纳米发电方面的研究;

周雄图(1982—), 男, 教授, 研究方向为光电显示技术与器件方面的研究。

** 通讯作者

creased with the increase of phosphor and barium titanate content. When ZnS: Cu/BaTiO₃/PDMS=2: 2: 1, the device performance was the best, and the lower opening voltage could be achieved. The luminance could reach 1.16 cd/m² at 40 V and 2 kHz. Finally, the flexible ACEL device was integrated with the vertical contact separation friction nanogenerator. The maximum output voltage and current of the TENG could reach 360 V and 46 μA, which could light up the flexible ACEL devices. The self-powered flexible ACEL devices could provide a new method for wearable display and interaction.

Key words: alternating current electroluminescence device; copper-doped zinc sulfide, triboelectric nanogenerator; self-powered

引 言

随着物联网和人工智能的快速发展,柔性发光器件对于可穿戴电子设备中的信息显示和交互非常重要^[1-3]。几十年来,电致发光器件因其在显示和照明中的巨大应用商业价值而成为研究热点。电致发光是一种由电流注入或者电场激发而引起发光分子发光的现象^[4]。电致发光器件可分注入型电致发光器件和高场型电致发光器件^[5, 6]。相对于发光二极管(Light emitting diode, LED)和有机发光二极管(Organic light emitting diode, OLED)等直流驱动的载流子注入型发光来说,交流电致发光(Alternating current electroluminescence, ACEL)器件由于结构简单、本征柔性、可大面积均匀发光和易于集成等优点而备受关注^[7-9]。

在 ACEL 器件中,光是由荧光粉微粒在交变电场下发射出来。其中最典型的就是基于 ZnS: Cu 荧光粉的 ACEL 器件,其发光原理是通过外加高压电场,电子在阈值场强(10⁴ V/cm²)下加速获得足够能量碰撞荧光粉,使发光中心激发或离化产生电子-空穴对,发光中心通过辐射跃迁的方式使电子-空穴对重新复合,发出与能级对应的可见光^[10, 11]。对于粉末型的 ACEL 器件,通常将 ZnS: Cu 荧光和有机绝缘弹性体结合,采用旋涂或刮涂等方式可以轻松的制备出高性能的柔性 ACEL 器件。得益于 ZnS: Cu 荧光粉的柔性 ACEL 器件的快速发展,其在可穿戴健康监测设备、软体机器人和电子皮肤等方面具有很强的应用前景^[12-15]。

目前,柔性 ACEL 器件的驱动电压还比较高(定义为 EL 器件亮度为 1 cd/m² 时的偏置电压),这需要外加复杂的高频/高压的交流电源。高驱动电压的 ACEL 器件对人体安全性和便捷性造成了一定的影响,限制了其在穿戴显示方面的应用。采用高介电绝缘材料作为 ACEL 器件的介电层,通过提

高器件发光层中荧光粉周围的场强来提高器件的亮度,达到低的器件电压驱动^[16-18],从而提高穿戴设备的安全性。同时,利用自然界存在的机械能代替复杂的交流电源来驱动柔性 ACEL 器件一直是研究的热点。摩擦纳米发电(Triboelectric nanogenerator, TENG)利用不规则机械能产生的低频交流电可以直接驱动 ACEL 器件发光, ACEL 器件与 TENG 的集成被证明是提高穿戴显示设备应用的有效方法^[19-21]。

研究以 ZnS: Cu 荧光粉为发光材料,聚二甲基硅氧烷(PDMS)和钛酸钡(BaTiO₃)作为绝缘介电材料,采用刮涂技术在图案化的 ITO/PET 衬底上制备了柔性 ACEL 器件。通过优化复合发光层内部各种材料的比例,当 ZnS: Cu/BaTiO₃/PDMS=2: 2: 1 时,其开启电压为 40 V(2 kHz),亮度为 1.16 cd/m²,实现了柔性 ACEL 器件的低压驱动;最后制备了高性能的接触分离式摩擦纳米发电机 TENG,其具有 350 V 的电压和 46 μA 的电流,可以代替商用的交流电源很轻松地点亮 ACEL 器件。该自供电的 ACEL 器件在可穿戴显示设备和电子皮肤系统中具有巨大的潜力。

1 器件制备与测试

1.1 材料获取

柔性 ITO/PET 和 PET 购自华南湘城科技有限公司;掺铜硫化锌荧光粉(ZnS:Cu, 29 μm)由上海科炎科技有限公司合成;聚四氟乙烯(PTFE)和钛酸钡(BaTiO₃, <1 μm)购自阿拉丁科技有限公司;聚二甲基硅氧烷(PDMS)和其交联剂(弹性基质与交联剂质量比为 10: 1)购自道康宁科技有限公司;PMMA、铝膜和鹅毛均来自商业来源,易获得。

1.2 ACEL 器件的制备

图 1(a)是柔性 ACEL 器件的结构示意图,其结构类似三明治,主要由柔性衬底,顶电极,复合发光层和底电极组成。复合发光层通过刮涂技术,在透明电极上进行成膜,无需苛刻的制备条件。首先将 ITO/PET 透明电极依次用丙酮、去离子水和异丙醇超声清洗 20 min,真空氮气流干燥电极。其次将 PDMS、ZnS: Cu 荧光粉和 BaTiO₃按 1: 2: 2 的质量比均匀混合,在烧杯中搅拌 30 min,制备成复合发光层浆料;然后将制备好的复合发光层浆料通过刮涂机涂覆在 ITO/PET 电极上,并在 70 °C 下真空干燥 5 min,制备成发光层。最后趁发光层表面还没完全固化,将另一片清洗好的 ITO/PET 电极贴附在裸露发光层的一面,继续在 70 °C 真空干燥 20 min,使发光层与柔性透明电极紧密结合,制备流程如图 1(b)所示,从而得到完整的柔性 ACEL 器件。

1.3 TENG 器件的制备

将铝膜(Al, 40×35 mm²)附着在 PMMA 基板的中心(75×50 mm²)作为电极。然后对羽毛材料进行修剪,将羽毛用双面胶带粘在铝膜上作为摩擦层材料。与此同时,将聚四氟乙烯(PTFE)薄膜作为另一种摩擦层材料,粘在另外一块附有铝膜的 PMMA 基板上。最后,将两个 PMMA 基板由 0.175 mm 厚的柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜连接和支撑,形成具有垂直接触分离结构的摩擦电纳米发电机(TENG)。

1.4 表征与测试

采用了场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)测量了 ZnS: Cu 荧光粉和 BaTiO₃颗粒的形貌、粒径、以及 ACEL 器件的横截面形貌图;通过与高压放大器(Aigtek, ATA-122D)连接的函数信号发生器(RIGOL, DG4162)来提供 ACEL 器件的驱动电压;ACEL 器件的亮度和光谱由远方亮度计(SCR-200)获取;TENG 的开路电压和短路电流由可编程电流计(美国 Keithley6514)测试得到。

2 结果分析与讨论

2.1 柔性 ACEL 器件结构分析

柔性 ACEL 器件主要由夹在两个透明电极之

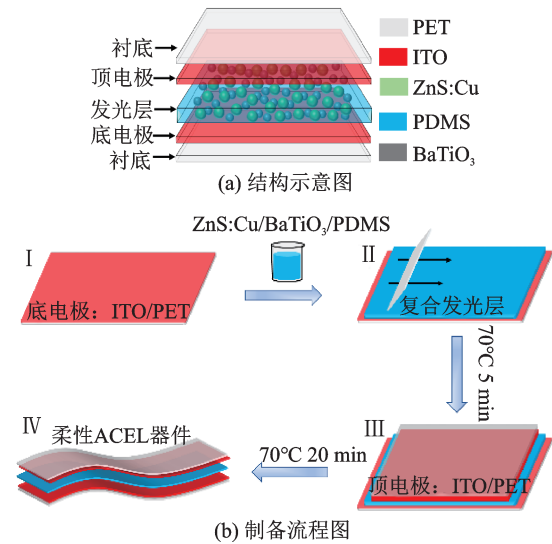


图 1 柔性 ACEL 器件

Fig.1 Flexible ACEL devices

间的复合发光层组成,其中柔性透明电极选用市面上最常见的 ITO/PET 电极,由于其高透明度($\geq 85\%$),低电阻($5\Omega \text{ sq}^{-1}$)和柔韧性,而成为广泛使用的透明电极。图 2(a)是柔性 ACEL 器件的 SEM 截面形貌图,可以看出复合发光层与透明电极之间界面清晰,结合紧密。复合发光层由无机荧光粉、高介电绝缘粉末(BaTiO₃)和有机粘合剂(PDMS)组成,各组分均匀的分散在复合发光层中,如图 2(b)所示。其中,荧光粉选用了化学性能和电致发光性能稳定的掺铜硫化锌(ZnS: Cu),其表面形貌和粒径分布如图 2(c)所示;对于 ZnS: Cu 荧光粉来说,硫化锌(ZnS)是主体材料,铜(Cu)是激发过程中发出绿色或蓝光的发光中心^[22]。BaTiO₃作为常用的无机绝缘材料,由于其高介电常数,可以有效地提高有机粘合剂(PDMS)的绝缘介电特性,增加荧光粉颗粒附近的电场强度,从而提高 ACEL 器件的光电性能,BaTiO₃的表面形貌和粒径分布如图 2(d)所示。

2.2 荧光粉与有机聚合物比例对器件性能的影响

ZnS: Cu 荧光颗粒与有机聚合物 PDMS 的含量直接影响 ACEL 器件的光电性能。为了探究荧光粉与 PDMS 之间的掺比对器件发光性能的影响,采用电压为 200 V,频率为 1 kHz 的交流电驱动 ACEL 器件,并测量了荧光粉含量为 20 %~75 % (质量比)的器件亮度和光谱,结果如图 3(a)和图 3(b)所示。从图 3 可以看出,随着荧光粉含量的增大,ACEL 器件的亮度变亮,这是由于随着荧光粉含量的掺杂增加,发光层内部单位面积的荧光分子含量

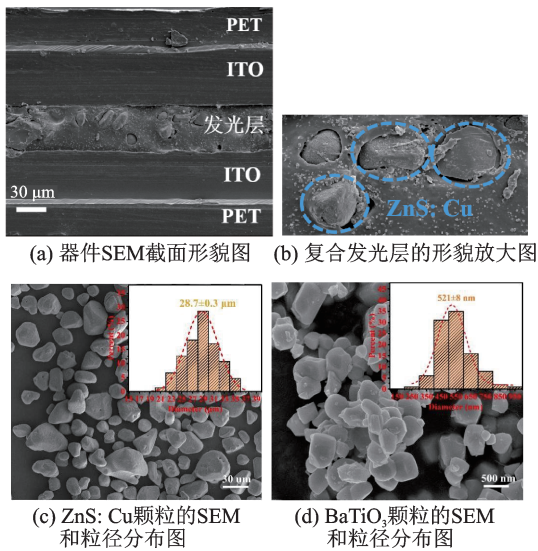


图2 柔性ACEL器件结构分析

Fig.2 Structure analysis of flexible ACEL devices

增加,在偏置电压下,荧光粉被激发的概率变大。因此,ACEL器件的亮度随着荧光粉掺杂含量的增加而逐渐变亮。然而,随着荧光粉含量进一步增加,当荧光粉含量达到80%时,ZnS:Cu/PDMS无法形成可刮涂的浆料,不能制备出高柔性的ACEL器件,这是由于聚合物基底(PDMS)溶解荧光粉颗粒的容量达到饱和了。

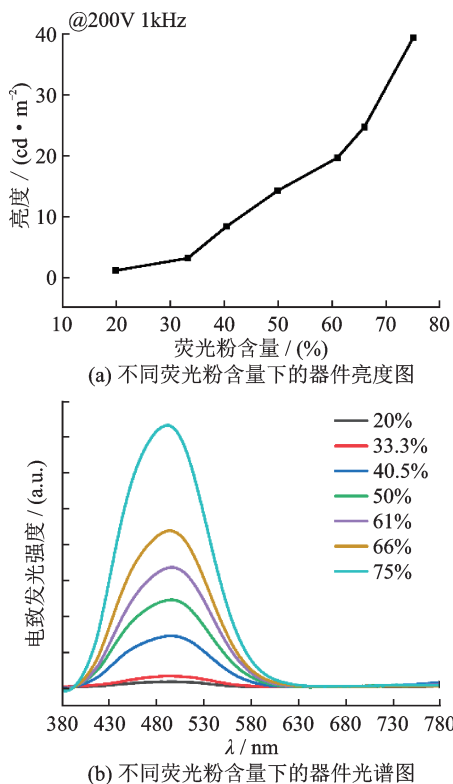


图3 荧光粉含量对ACEL器件光电性能影响

Fig.3 Effect of phosphor content on photoelectric performance of ACEL devices

2.3 高介电纳米颗粒对器件性能的影响

ACEL器件发光主要由ZnS:Cu荧光粉来完成,当发光层内部的电场强度大于 10^4 V/cm时,可以观察到ACEL器件的发光。因此,在外加驱动电压一定时,为了提高器件的亮度,需要提高荧光粉周围的电场强度。目前,使用有机硅胶(PDMS,介电常数约为2.8)作为ZnS:Cu荧光粉的粘合剂虽然可以很容易制备出柔性ACEL器件,但其低介电常数的特性限制了ACEL器件在低电压下的使用。通过将高介电常数的颗粒掺入有机聚合物中可以有效提高发光层的电场极化,明显提高ACEL器件的亮度。将具有高介电常数的钛酸钡($BaTiO_3$)颗粒掺杂进ZnS:Cu/PDMS发光层中,进一步探究 $BaTiO_3$ 颗粒含量对于ACEL器件性能的影响。控制发光层中ZnS:Cu/PDMS=2:1的比例不变,制备了不同 $BaTiO_3$ 含量掺杂(0~50%)的ACEL器件,并测量不同 $BaTiO_3$ 含量掺杂的ACEL器件亮度与光谱。如图3(a)和(b)所示,掺杂 $BaTiO_3$ 颗粒的ACEL器件相对于没有掺杂 $BaTiO_3$ 颗粒的ACEL器件的亮度明显增加,当掺杂含量为40%时($BaTiO_3/ZnS:Cu/PDMS=2:2:1$),器件亮度达到最大,在电压200 V和频率1 kHz下,器件亮度为62.3

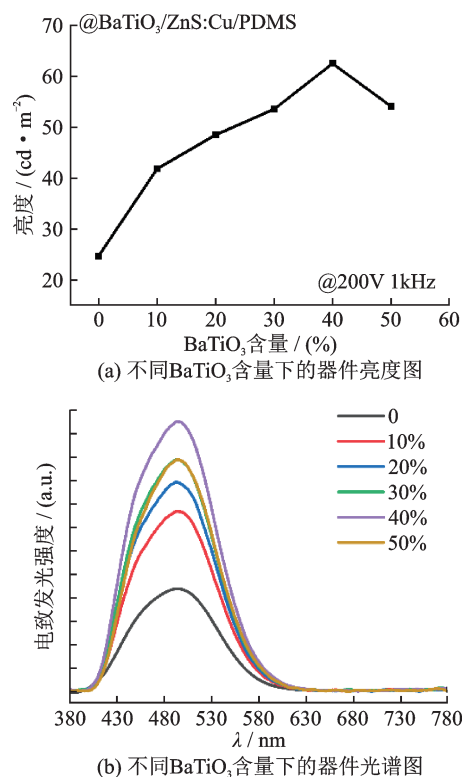


图4 $BaTiO_3$ 含量对ACEL器件光电性能影响

Fig.4 Effect of $BaTiO_3$ content on photoelectric performance of ACEL devices

cd/m^2 , 相对于没有掺杂 BaTiO_3 的 ACEL 器件 (亮度为 $24.7 \text{ cd}/\text{m}^2$), 亮度增加了 2.5 倍左右。表明使用高介电常数的绝缘材料作为荧光粉的绝缘层材料, 可以有效提高器件的亮度。随着 BaTiO_3 含量的增加, ACEL 器件的亮度先增加后减少。随着 BaTiO_3 相对含量的增加, $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 荧光粉颗粒相对含量在不断减少, 造成发光层中单位体积的发光分子减少, 因此亮度降低。

2.4 驱动电压及频率对器件性能的影响

亮度和光谱可以用作评估柔性 ACEL 器件的性能, 图 5(a) 展示了柔性 ACEL 器件的亮度与电压之间的关系, 当频率一定时, ACEL 器件的亮度随着电压的增加而逐渐增加, 在 40 V (2 kHz) 的开启电压下, 器件的亮度为 $1.16 \text{ cd}/\text{m}^2$, 同时器件的亮度与电压之间的关系可以很好的拟合成一个函数经验表达式:

$$L = L_0 \exp\left(-\frac{\beta}{\sqrt{V}}\right) \quad (1)$$

其中, L 是器件亮度, V 是施加的电压, L_0 和 β 是由器

件材料和结构确定的参数^[1]。主要原因是由于随着偏置电压的增加, 发光层内部电场强度增加, 使得游离态电子被激发碰撞发光中心的几率变大, 引起发光亮度的增大。值得一提的是, ACEL 器件的亮度对驱动频率极其敏感, 如图 5(b) 所示; 电压一定时, 随着驱动频率增加, 器件的亮度先逐渐增加达到峰值后开始减小, 在驱动频率为 80 kHz 时, 器件的亮度达到最大。这是因为随着驱动频率的增加, 器件发光层内部的发光中心受激发态电子碰撞的频率增大, 器件亮度变大; 当频率过大时, 器件发光层内部的发光中心已经达到饱和, 造成 ACEL 器件的亮度减低。

除此之外, 驱动频率可以引起 ACEL 器件的光谱中心波长变化, 如图 5(c) 所示。当电压一定时, 随着驱动频率从 500 Hz 增加到 80 kHz 时, 器件的光谱中心波长从 504 nm (绿色) 移动到 452 nm (蓝色), 发生了明显的蓝移现象, 这归因于 $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 荧光粉颗粒本身能带结构的特殊性。 Cu^{2+} 作为发光中心具有两个发光能级, 一个远离价带的深受主能级 (绿色发光中心) 和靠近价带的浅受主能级 (蓝色发光

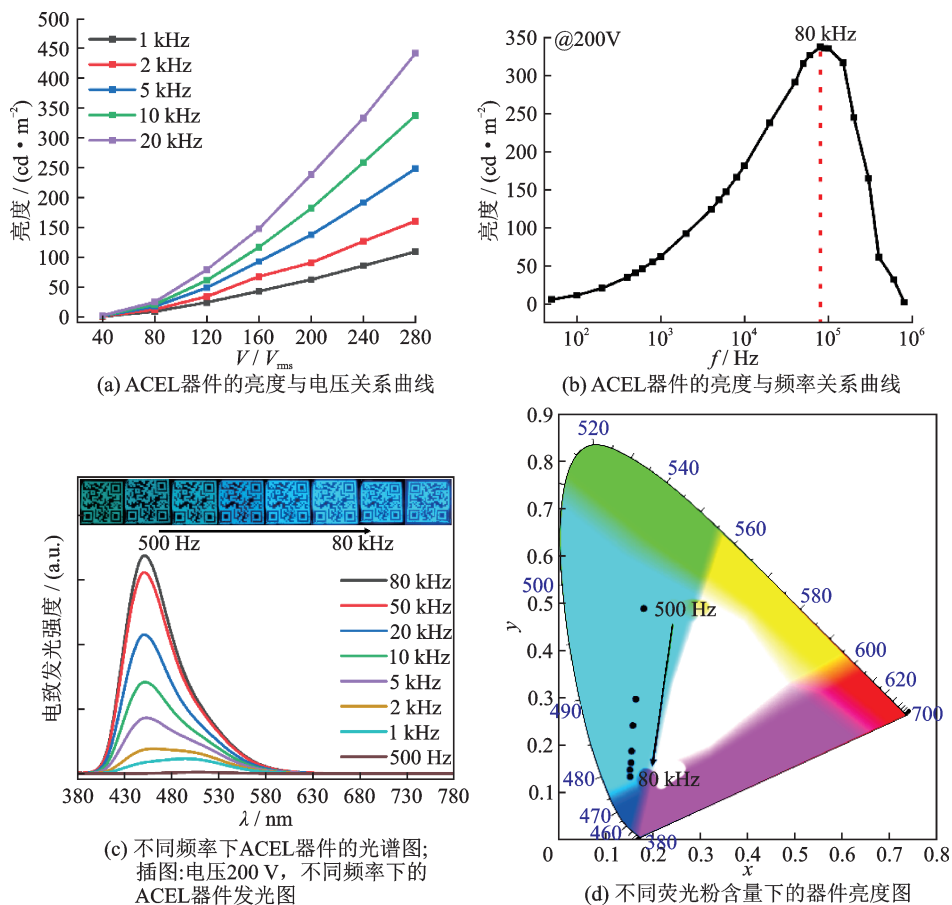


图 5 驱动电压及频率对 ACEL 器件的光电性能影响

Fig.5 Effect of driving voltage and frequency on photoelectric performance of ACEL devices

中心)。在低频下,由于空穴寿命短于半激发周期,蓝光能级上的空穴易被来自于绿光能级中的电子振动弛豫复合掉,因此大多数激发态电子倾向于往绿光能级辐射跃迁,可以观察到绿光现象。在高频下,空穴寿命长于半激发周期,可以诱导蓝光能级上的空穴成为主要的复合中心,使得器件的蓝光占主体,导致光谱发射中心峰蓝移^[23-25]。同时,在图5(d)的色坐标图中也可以清晰的看出,在较高频率下呈现蓝移。

2.5 摩擦纳米发电机和柔性 ACEL 器件的集成研究

目前,对于柔性 ACEL 器件来说,电源驱动设备由于其体积大、不方便携带和安全性等问题,限制了其在柔性穿戴电子方面的应用。利用摩擦纳米发电技术驱动 ACEL 器件的自供电方式脱颖而出。图6(a)所示为利用摩擦纳米发电机(TENG)

驱动柔性 ACEL 器件的结构示意图。文中采用的是垂直接触分离式 TENG,其摩擦层材料分别由羽毛层(正极性材料)和聚四氟乙烯(PTFE,负极性材料)层来收集电荷。电荷转移的原理图如图5(b)所示,在初始状态下(阶段 I),当使用外力压缩 TENG 器件时,电子从羽毛表面转移到 PTFE 层。当 TENG 分离时(阶段 II),由于静电感应效应,两个导电铝层会产生与连接的摩擦层相反的感应电荷,在开路的情况下会形成电位差。同样的,当 TENG 器件的两个摩擦起电层从分开到最远距离,到施加压力使之重新接触的过程时(阶段 III 到阶段 IV),在两个电极之间会形成反向电流^[26, 27]。图6(c)和图6(d)所示为接触分离式 TENG 的输出性能,其开路电压约为 350 V,短路电流约为 46 μA 。图6(e)和图6(f)展示了自供电的柔性 ACEL 系统,柔性 ACEL 器件可以通过接触分离式 TENG 轻松点亮,将为柔性穿戴显示提供一个有效的方式。

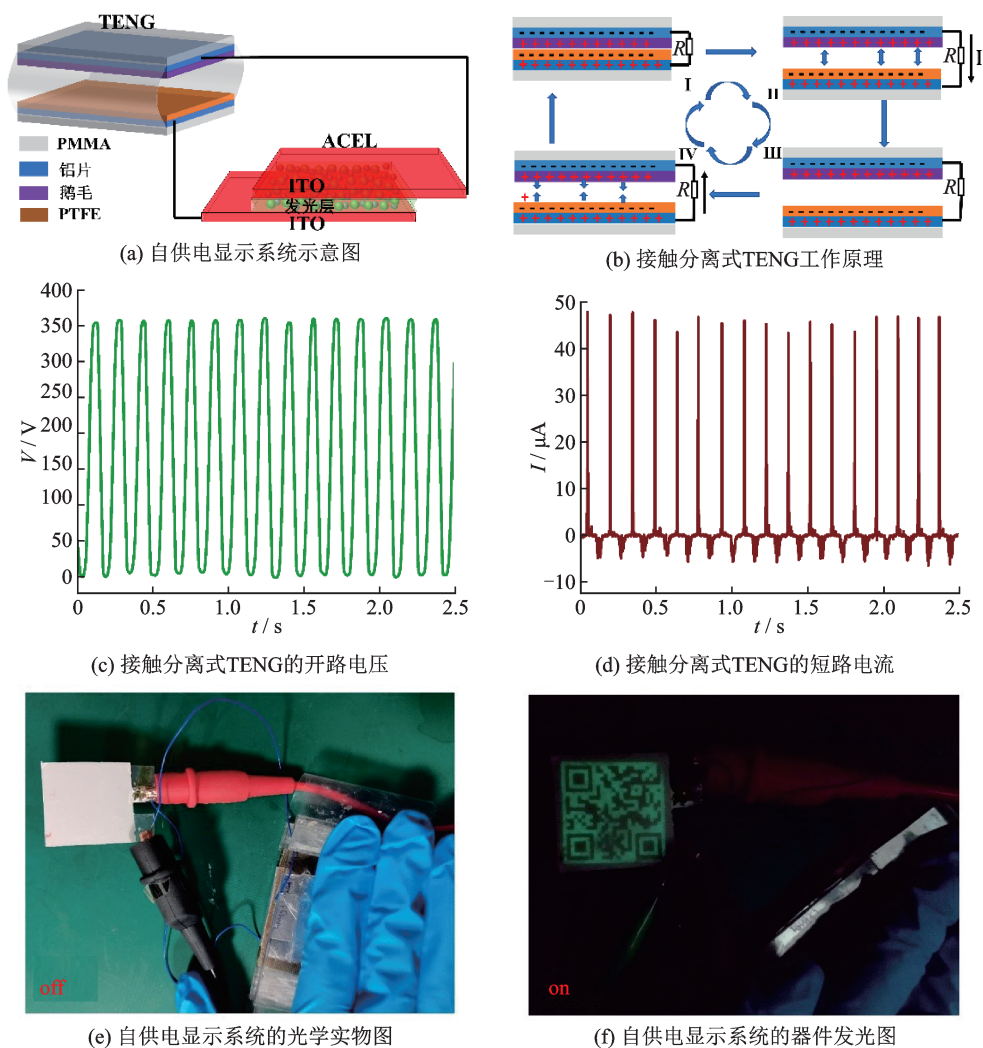


图6 基于 ACEL 器件和接触分离式 TENG 的自供电显示系统

Fig.6 Self-powered display system based on ACEL device and contact separation TENG

3 结 论

研究以 ZnS: Cu 荧光粉作为无机发光材料, PDMS 和 BaTiO₃ 作为绝缘介电材料, 利用刮涂法在图案化的 ITO/PET 电极上制备了柔性 ACEL 器件。同时研究了复合发光层中不同材料掺比对器件光电性能的影响, 得到当 PDMS/BaTiO₃/ZnS: Cu = 1: 2: 2 时, ACEL 器件的光电性能最好, 器件亮度在 40 V 和 2 kHz 下可达 1.16 cd/m², 实现了较低的开启电压。同时, 研究了驱动电压和频率对 ACEL 器件亮度和光谱的影响。最后, 利用摩擦纳米发电原理, 制备出垂直接触分离式 TENG, 其开路电压可达 360 V, 短路电流 46 μA 左右, 可以轻松点亮制备好的柔性 ACEL 器件。自供电的 ACEL 器件对于穿戴显示和交互具有较强的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Zhang X, Wang F. Recent advances in flexible alternating current electroluminescent devices [J]. *APL Materials*, 2021, 9 (3): 030701.
- [2] Yokota T, Zalar P, Kaltenbrunner M, et al. Ultraflexible organic photonic skin [J]. *Science Advances*, 2016, 2 (4): 1501856.
- [3] Wang X C, Sun J L, Dong L, et al. Stretchable and transparent electroluminescent device driven by triboelectric nanogenerator [J]. *Nano Energy*, 2019, 58: 410-418.
- [4] Jayathilaka W, Chinnappan A, Tey J N, et al. Alternative current electroluminescence and flexible light emitting devices [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(19): 5553-5572.
- [5] Hung L S, Tang C W, Mason M G. Enhanced electron injection in organic electroluminescence devices using an Al/LiF electrode [J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70(2): 152-154.
- [6] Destriau G. Recherches sur les scintillations des sulfures de zinc aux rayons α [J]. *Journal de Chimie Physique*, 1936, 33: 587-625.
- [7] Wang J X, Yan C Y, Lee P S, et al. Highly stretchable and self-deformable alternating current electroluminescent devices [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(18): 2876-2882.
- [8] Wang J X, Yan C Y, Cai G F, et al. Extremely stretchable electroluminescent devices with ionic conductors [J]. *Advanced Materials*, 2015, 28(22): 4489-4489.
- [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] Michael B, Hubert S D. Materials for powder-based AC-electroluminescence [J]. *Materials*, 2010, 3(2): 1353.
- [11] Fischer A G. Electroluminescent lines in ZnS powder particles [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1963, 110 (7): 733.
- [12] Kim E H, Han H, Yu S, et al. Interactive skin display with epidermal stimuli electrode [J]. *Advanced Science*, 2019, 6(13): 1802351.
- [13] Lee G, Kong M, Park D, et al. Electro-photoluminescence color change for deformable visual encryption [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(22): 1907477.
- [14] He Y, Zhang M, 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.
- [15] Larson C, Peele B, Li S, et al. Highly stretchable electroluminescent skin for optical signaling and tactile sensing [J]. *Science*, 2016, 351(6277): 1071-1074.
- [16] Xie P, Mao J, Luo Y. Highly bright and stable electroluminescent devices with extraordinary stretchability and ultraconformability [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(3): 484-489.
- [17] Zhao C, Zhou Y, Gu S, et al. Fully screen-printed, multicolor, and stretchable electroluminescent displays for epidermal electronics [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12 (42): 47902-47910.
- [18] Tan Y J, Godaba H, Chen G, et al. A transparent, self-healing and high-k dielectric for low-field-emission stretchable optoelectronics [J]. *Nature Materials*, 2020, 19(7): 182-188.
- [19] Chang Y, Sun J L, Dong Lin, et al. Self-powered multi-color display based on stretchable self-healing alternating current electroluminescent devices [J]. *Nano Energy*, 2022, 95: 107061.
- [20] Zhang S, Qu C, Xiao Y, et al. Flexible alternating current electroluminescent devices integrated with high voltage triboelectric nanogenerators [J]. *Nanoscale*, 2022, 14(11): 4244-4253.
- [21] Sun Y, Zhu L, Yang J, et al. Flexible alternating-current electroluminescence plunging to below 1 Hz frequency by triboelectrification [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(1): 2101918.
- [22] Zuo Y, Shi X, Zhou X, et al. Flexible color-tunable electroluminescent devices by designing dielectric-distinguishing double-stacked emissive layers [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(50): 2005200.
- [23] 王 辉, 孟令国, 梁志虎, 等. ZnS:Cu 粉末交流电致发光器件特性研究 [J]. *真空电子技术*, 2008, 6: 1-4.
- [24] Shanker R, Cho S, Choe A, et al. Solution-processable, high-performance flexible electroluminescent devices based on high-k nanodielectrics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29 (39): 1904377.
- [25] Cho S, Kang D H, Lee H, et al. Highly stretchable sound-in-display electronics based on strain-insensitive metallic nanonetworks [J]. *Advanced Science*, 2021, 8(1): 2001647.
- [26] Wang Z L. Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(11): 9533.
- [27] Jsa B, Yu C A, Lin D A, et al. MXene enhanced self-powered alternating current electroluminescence devices for patterned flexible displays-science direct [J]. *Nano Energy*, 2021, 86: 106077.