

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-12

基于摩擦电纳米发电机的湿度传感和白光发射

朱世雄^{1,2}, 颜晓红^{1,2*}, 王祥夫^{1,2*}

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023;

2. 江苏省射频与微纳电子实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 环境湿度信息的感知与可视化表达对于智能环境监测具有重要意义。然而,传统湿度传感器通常将湿度变化转换为电学参数的变化并借助外部电路实现信息的读取和反馈,限制了感知与视觉呈现的一体化发展。本文采用NaCl/PVA作为湿度响应摩擦层,构建湿度响应型摩擦电纳米发电机(Humidity-responsive Triboelectric Nanogenerator, H-TENG),并结合 $\text{LiY}_6\text{O}_5(\text{BO}_3)_3:\text{Bi}^{3+}, \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ 荧光粉制备了白光LED,研究了环境湿度对H-TENG电学输出及其驱动白光LED发光状态的影响。结果表明,在340 nm近紫外激发下,荧光粉依靠 Bi^{3+} 、 Eu^{2+} 和 Eu^{3+} 之间的协同发光,进一步利用H-TENG在不同湿度条件下产生的电学输出差异调控白光LED的发光状态。不同湿度条件下,器件均保持基本一致的白光光谱特征,呈现出可辨识的发光强度差异;随着环境湿度升高,H-TENG的电学输出逐渐降低,从而实现环境湿度状态的可视化指示。该研究为湿度传感信息的光学可视化提供了一种新的实现途径。

关键词: 湿度传感器; 摩擦电纳米发电机; 白光LED; 荧光粉

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

DOI: 10.3724/CJL.20260253

CSTR: 32170.14.CJL.20260253

Humidity Sensing and White-Light Emission Enabled by a Triboelectric Nanogenerator

Zhu Shixiong^{1,2}, Yan Xiaohong^{1,2*}, Wang Xiangfu^{1,2*}

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology),

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. Key Laboratory of Radio Frequency and Micro-Nano Electronics of Jiangsu Province, Nanjing 210023, China)

* Corresponding Authors, E-mail: yanxh@njupt.edu.cn (X. Yan), xfwang@njupt.edu.cn (X. Wang).

Abstract: Real-time sensing and visual expression of environmental humidity information are of great significance for intelligent environmental monitoring. However, conventional humidity sensors generally rely on humidity-induced variations in electrical parameters for detection and require additional signal processing and display modules for information feedback, which limits the integration of humidity sensing and visual presentation. In this work, a Humidity-responsive Triboelectric Nanogenerator (H-TENG) was constructed using NaCl/PVA as the humidity-responsive triboelectric layer. Combined with $\text{LiY}_6\text{O}_5(\text{BO}_3)_3:\text{Bi}^{3+}, \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ phosphor, a self-powered white-light LED was fabricated to investigate the regulation of environmental humidity on triboelectric generation and LED emission performance. The results demonstrate that the phosphor achieves stable white-light emission under 340 nm near-ultraviolet excitation through the synergistic luminescence of Bi^{3+} , Eu^{2+} and Eu^{3+} . The differences in the electrical output of the H-TENG under different humidity conditions were further utilized to regulate the emission state of the white-light LED. Under different humidity conditions, the device maintains essentially consistent white-light spectral characteristics while exhibiting distinguishable differences in emission intensity. As the environmental humidity increases,

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(NSFC62575145, NSFC12574266); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(23KJA510005)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC62575145, NSFC12574266); Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (Grant No. 23KJA510005).

es, the electrical output of the H-TENG gradually decreases, thereby enabling the visual indication of different environmental humidity states. This study provides a new approach for the optical visualization of humidity sensing information.

Keywords: Humidity Sensor; TENG; WLED; Phosphor

1 引 言

环境湿度作为反映环境状态的重要物理参数,在环境监测、智能制造、人体健康检测及智慧农业等领域发挥着重要作用^[1-3]。目前,湿度传感器主要包括电阻式、电容式等。其中,传统电阻式和电容式湿度传感器具有检测精度高、响应速度快等优点^[4-6],但通常需要外部电源供电,并需要借助外部电路对输出信号进行读取与反馈,难以直接实现环境湿度信息的直观表达。

近年来,湿度响应型摩擦电纳米发电机(Humidity-responsive Triboelectric Nanogenerator, H-TENG)能够将环境湿度变化直接转换为电学信号,兼具自驱动、结构简单、灵敏度高及易于集成等优势,在环境监测、智能传感及人体健康监测等领域展现出良好的应用潜力^[7-9]。与传统湿度传感器依赖外部供电并通过电阻、电容等参数变化实现检测不同,H-TENG基于摩擦起电与静电感应耦合机制,可直接利用环境湿度变化调控器件输出,实现湿度信息的感知。其湿度响应特性主要来源于水分子在摩擦界面的吸附与扩散过程,以及由此引起的表面电荷生成、转移和保持行为变化。^[10-11]同时,近年来研究者通过湿敏材料复合、界面结构调控以及器件构型优化等策略,不断提升H-TENG的湿度响应范围、输出稳定性和传感灵敏度,使其在无线环境监测、可穿戴电子器件以及人体生理信息检测等方向展现出更加广泛的应用前景^[12-13]。

然而,现有H-TENG研究通常主要关注湿度响应及电学输出性能,重点考察器件的电压、电流和电荷等输出参数,而对于如何将湿度传感结果进一步转化为直观可感知信号的研究相对有限。由于电信号通常需要经过相应的读取、处理和反馈环节才能实现信息呈现,因此,如何减少对额外信号处理环节的依赖并实现湿度信息的直观表达,仍具有一定的研究价值。因此,将H-TENG的湿度响应进一步转化为可直接感知的光学信号,有望实现湿度传感与信息显示的功能融合,为湿

度状态的直观反馈提供一种可行途径。

基于此,本文采用NaCl/PVA作为湿度响应摩擦层构建H-TENG,并结合 $\text{LiY}_{5.97-x}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3$: Bi^{3+} , Eu^{2+} , Eu^{3+} 白光荧光粉,研究H-TENG湿度响应及其对LED发光状态的影响。通过利用H-TENG在不同环境湿度下产生的电学输出差异驱动白光LED,使不同湿度条件下的传感结果进一步转化为可辨识的光学信号,从而实现环境湿度状态的可视化指示。本文系统研究H-TENG的湿度响应特性及白光LED的发光性能,旨在构建兼具湿度传感与光学反馈功能的一体化器件,为湿度传感信息的直观表达提供一种实现途径。

2 实 验

2.1 $\text{LiY}_{5.97-x}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3$: $x\text{Bi}^{3+}$, 0.03Eu^{2+} , Eu^{3+} ($x=0, 0.06$) 荧光粉的制备

采用传统高温固相反应法制备了 $\text{LiY}_{5.97-x}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3$: $x\text{Bi}^{3+}$, 0.03Eu^{2+} , Eu^{3+} ($x=0, 0.06$) 荧光粉。以 Li_2CO_3 (99.99%), Y_2O_3 (99.99%), Bi_2O_3 (99.99%), Eu_2O_3 (99.99%), H_3BO_3 (99.99%)为原料。额外加入15%的 Li_2CO_3 和5%的 H_3BO_3 作为高温煅烧过程中 Li_2CO_3 和 H_3BO_3 的挥发损失的补偿。按化学计量比准确称取各原料,充分混合后球磨24 h,以保证各组分充分均匀混合。随后将混合粉末置于 Al_2O_3 坩埚中,在空气气氛下于500 °C预烧10 h。待样品自然冷却至室温后,将预烧产物重新研磨,并在空气气氛下于900 °C煅烧10 h。最终将所得样品研磨成细粉,用于后续的物相结构及发光性能测试^[14]。

2.2 荧光粉/PDMS白光LED器件的制备

将荧光粉与聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)按质量比3:2混合,其中PDMS与固化剂的质量比为10:1。将混合物充分搅拌20 min,制得均匀的荧光粉/PDMS浆料,随后在真空条件下脱泡10 min,以去除浆料中的气泡。将所得浆料均匀涂覆于340 nm紫外LED芯片表面,并于40 °C下固化12 h,最终制备得到白光LED器件。

2.3 NaCl/PVA 复合薄膜的制备

采用水浴加热法制备 NaCl/PVA 复合薄膜。首先,将质量分数为 10% 的聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)加入去离子水中,在 80 °C 条件下搅拌至完全溶解,得到均匀透明的 PVA 水溶液。随后加入质量分数为 1% 的 NaCl,并继续搅拌至溶液混合均匀。将所得溶液在真空条件下脱泡 30 min,以去除体系中的气泡,然后均匀浇于叉指铝电极表面,室温干燥 12 h,最终获得 NaCl/PVA 复合薄膜。

2.4 NaCl/PVA 基复合薄膜摩擦电纳米发电机的制备

旋转式 H-TENG 由转子和定子组成。转子采用 3D 打印技术制备,圆盘表面均匀设置 18 个凹槽,并嵌入厚度为 30 μm 的聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene, FEP)薄膜作为负性摩擦层。定子由叉指铝电极和 NaCl/PVA 摩擦层构成,其中铝电

极固定于圆形基底上,电极外圆半径和内圆半径分别为 7.9 和 7.6 cm,叉指电极间距为 1 mm,并引出导线用于外部电路连接。随后,将预先制备的 NaCl/PVA 复合溶液均匀涂覆于电极表面,形成厚度约为 30 μm 的正性摩擦层。最后,将转子与定子组装,获得旋转式 H-TENG 器件。

3 结果与讨论

3.1 晶体结构与物相表征

$\text{LiY}_6\text{O}_5(\text{BO}_3)_3$ 属于单斜晶系,空间群为 $P2_1/n$ (No. 14)^[14]。如图 1(a)所示,其晶体结构由相互连接的 Y-O 和 Li-O 多面体以及 BO_3 基团组成。 Y^{3+} 在晶体中有六配位和七配位两种局域环境。图 1(b)展示了晶体中具有代表性的 Y^{3+} - Y^{3+} 离子。由于晶格中存在多种不同的 Y^{3+} - Y^{3+} 间距,可为占据 Y^{3+} 格位的激活离子之间的能量迁移与能量传递提供可能的传输路径。

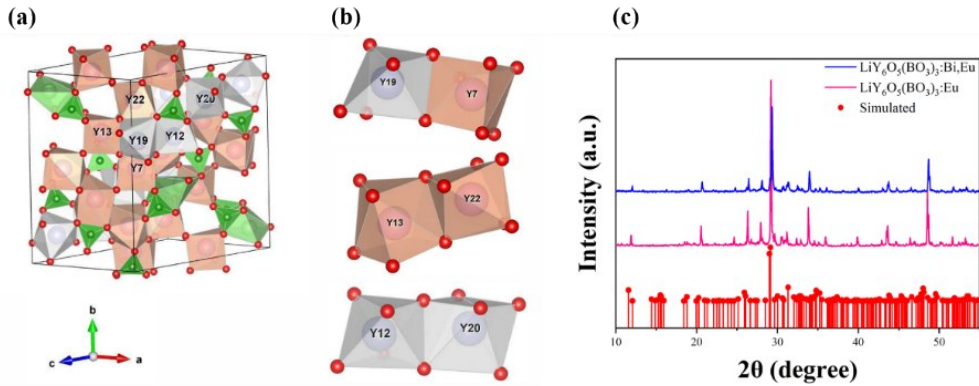


图 1 (a) $\text{LiY}_6\text{O}_5(\text{BO}_3)_3$ 的晶体结构, $[\text{YO}_6]$ 和 $[\text{YO}_7]$ 配位多面体以不同颜色表示; (b) 晶体结构中具有代表性的 Y^{3+} - Y^{3+} 离子; (c) $\text{LiY}_{5.97-x}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: x\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ ($x=0, 0.06$) 荧光粉的 XRD 图谱及基质材料的模拟衍射图谱。

Fig. 1 (a) Crystal structure of $\text{LiY}_6\text{O}_5(\text{BO}_3)_3$, where the $[\text{YO}_6]$ and $[\text{YO}_7]$ polyhedra are represented by different colors, (b) representative Y^{3+} - Y^{3+} pairs in the crystal structure, and (c) powder X-ray diffraction patterns of $\text{LiY}_{5.97-x}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: x\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ ($x=0, 0.06$), together with the simulated diffraction pattern of the host lattice.

图 1(c) 为 $\text{LiY}_{5.97-x}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: x\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ ($x=0, 0.06$) 荧光粉的 X 射线衍射(XRD)图谱。两种样品的衍射峰均与标准卡片(PDF#04-009-2712)吻合良好,未检测到任何杂质峰,表明 Bi 和 Eu 离子已成功掺入基质晶格,且未引起晶体结构的改变。上述结果说明所制备样品均为单一物相。此外,样品的衍射峰尖锐且分辨清晰,表明其具有良好的结晶性能。

为明确荧光粉中 Eu 离子的价态,对 $\text{LiY}_{5.97-x}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: x\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ ($x=0, 0.06$) 样品进行了 X 射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)测试,结果如图 2 所示。如图 2(a) 和 (b) 所

示,高分辨 Eu 3d 谱可拟合为 4 个特征峰。其中,结合能位于 1134.6 eV 和 1164.4 eV 处的峰分别对应 Eu^{2+} 的 $3d_{5/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 能级;位于 1154.6 eV 和 1195.0 eV 处的峰分别归属于 Eu^{3+} 的 $3d_{5/2}$ 和 $3d_{3/2}$ 能级^[15]。

需要指出的是, Eu^{3+} 取代 Y^{3+} 属于等价取代,而 Eu^{2+} 取代 Y^{3+} 属于异价取代,会在晶格中引入局域电荷失衡。为维持晶格的局域电荷平衡,该电荷失衡可通过晶格缺陷进行补偿,从而为 Eu^{2+} 在 Y^{3+} 位点上的形成与稳定存在提供有利的局部电荷环境^[16-17]。因此,在本研究中, Eu^{2+} 取代 Y^{3+} 所产生的电荷失衡可通过缺陷介导的电荷补偿机制得到一定程度的缓解。

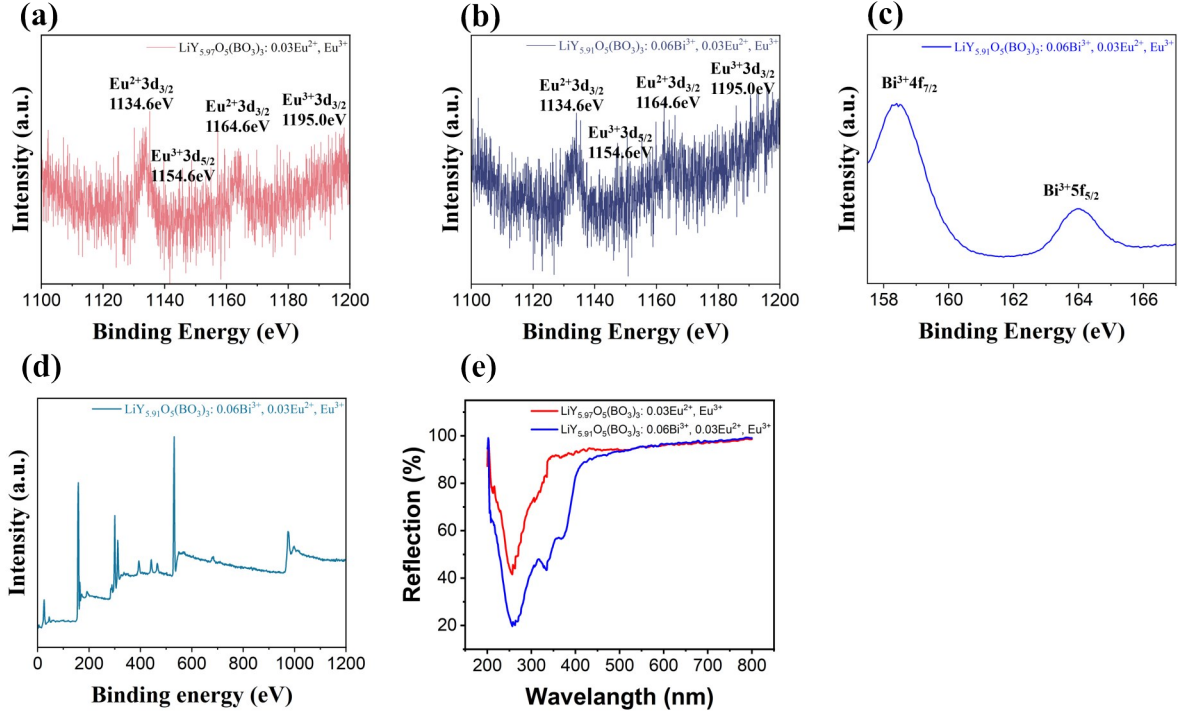


图2 $\text{LiY}_{5.97-x}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: x\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ ($x=0, 0.06$) 荧光粉的 XPS: (a) $\text{LiY}_{5.97}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ 的 Eu 3d 谱; (b) $\text{LiY}_{5.91}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.06\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ 的 Eu 3d 谱; (c) $\text{LiY}_{5.91}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.06\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ 的 Bi 4f 谱; (d) $\text{LiY}_{5.91}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.06\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ 的 XPS 全谱; (e) $\text{LiY}_{5.97-x}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: x\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ ($x=0, 0.06$) 荧光粉的 DRS。

Fig. 2 XPS spectra of $\text{LiY}_{5.97-x}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: x\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ ($x=0, 0.06$) phosphors: (a) Eu 3d spectrum of $\text{LiY}_{5.97}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$, (b) Eu 3d spectrum of $\text{LiY}_{5.91}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.06\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$, (c) Bi 4f spectrum of $\text{LiY}_{5.91}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.06\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$, (d) survey XPS spectrum of $\text{LiY}_{5.91}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.06\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$, and (e) DRS spectra of $\text{LiY}_{5.97-x}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: x\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ ($x=0, 0.06$)

此外, $\text{LiY}_{5.91}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.06\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ 荧光粉的高分辨 Bi 4f XPS 谱如图 2(c) 所示。谱图中可观察到明显的 Bi 4f 双峰, 其结合能分别位于 158.3 eV 和 163.6 eV, 对应 Bi 4f_{7/2} 和 Bi 4f_{5/2} 能级。结合其特征结合能及已有文献报道, 可将其归属于 Bi³⁺[18]。

为进一步从体相光学性质的角度验证 Eu²⁺ 的存在, 对两种荧光粉进行了漫反射光谱(diffuse reflectance spectroscopy, DRS)测试, 结果如图 2(e) 所示。可以观察到, 两种样品在紫外-近紫外区域均表现出明显的宽带吸收特征, 其中 $\text{LiY}_{5.97}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ 样品在约 250-400 nm 范围内呈现较强的连续吸收, 而引入 Bi³⁺ 后, $\text{LiY}_{5.91}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.06\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ 样品的吸收范围进一步向长波方向延伸, 并在约 400 nm 附近仍保持较明显的吸收。该紫外-近紫外区域的宽带吸收可归因于 Eu²⁺ 的 4f⁷→4f⁶5d¹ 允许跃迁, 其与 Eu²⁺ 具有较强晶场敏感性的 5d 能级特征相符。^[19-20]

综上, XPS 与 DRS 结果共同表明, 样品中 Bi³⁺、Eu²⁺ 和 Eu³⁺ 发光中心均呈现出相应的特征信号, 为后续发光性能及能量传递机理分析提供了依据。

3.2 $\text{LiY}_{5.97-x}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: x\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ ($x=0, 0.06$) 荧光粉的光致发光性能

图 3 (a) 和 (b) 分别为 $\text{LiY}_{5.97}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ 和 $\text{LiY}_{5.91}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.06\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ 荧光粉的发射光谱。如图 3(a) 所示, 在 340 nm 激发下, $\text{LiY}_{5.97}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ 荧光粉同时表现出 Eu³⁺ 的特征窄带发射和位于约 450-550 nm 范围内的宽带发射。其中, 宽带发射来源于 Eu²⁺ 的 4f⁶5d¹→4f⁷ 允许跃迁。由于 Eu²⁺ 的 5d 能级对局域晶体场环境高度敏感, 因此其发射通常表现为宽带特征, 该蓝绿色宽带发射能够与 Eu³⁺ 的红光发射形成有效互补。此外, 在约 590、615、650 和 700 nm 处还可观察到 Eu³⁺ 的特征发射峰, 分别对应于 ⁵D₀→⁷F₁、⁵D₀→⁷F₂、⁵D₀→⁷F₃

和 $^5D_0 \rightarrow ^7F_4$ 跃迁^[21]。其中, 615 nm 处对应的 $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ 电偶极跃迁为主发射峰, 其发射强度明显高于 $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ 磁偶极跃迁, 表明 Eu^{3+} 占据了非中心对称的低对称性晶格环境。 Eu^{2+} 的宽带发射与 Eu^{3+} 的特征红光发射共同实现了约 420-700 nm 范围内的宽光谱覆盖。表 1 汇总了近年来典型 Eu 基

发光材料的发射光谱覆盖范围。与已有报道相比, $LiY_{5.97}O_5(BO_3)_3: 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$ 在保持 Eu^{3+} 特征红光发射的同时, 具有更宽的发射光谱覆盖范围。这种宽带发射特性有利于拓宽可见光谱覆盖、提高器件显色性能, 表明该荧光粉在宽光谱白光 LED 领域具有良好的应用潜力。

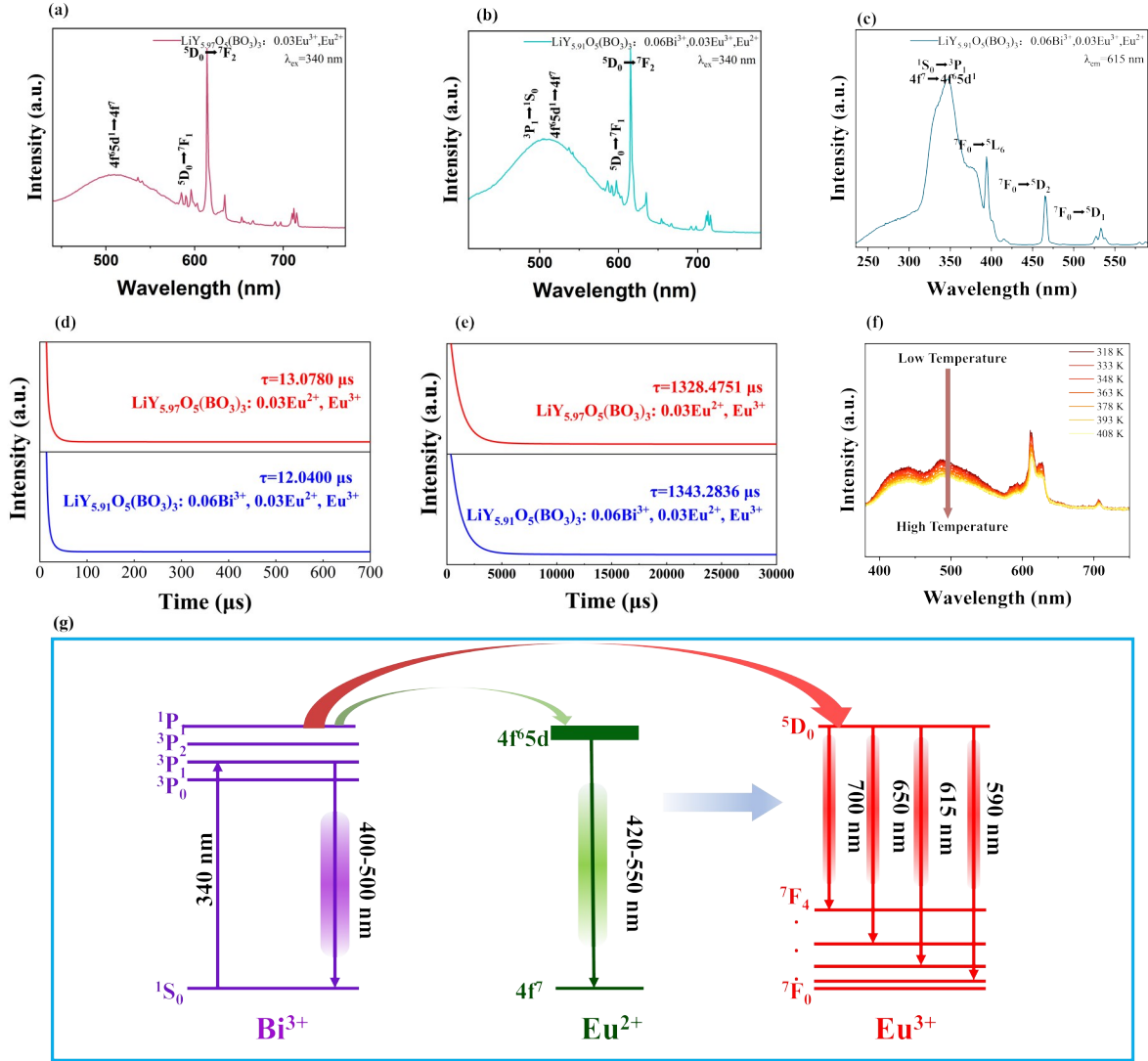


图 3 (a, b) $LiY_{5.97-x}O_5(BO_3)_3: xBi^{3+}, 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$ (x=0, 0.06) 荧光粉的光致发光发射光谱; (c) $LiY_{5.91}O_5(BO_3)_3: 0.06Bi^{3+}, 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$ 荧光粉在 615 nm 监测波长下的激发光谱; $LiY_{5.97-x}O_5(BO_3)_3: xBi^{3+}, 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$ (x=0, 0.06) 荧光粉的荧光衰减曲线; (d) 340 nm 激发, 500 nm 监测; (e) 340 nm 激发, 615 nm 监测; (f) $LiY_{5.91}O_5(BO_3)_3: 0.06Bi^{3+}, 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$ 荧光粉的变温发射光谱; (g) $LiY_{5.91}O_5(BO_3)_3: 0.06Bi^{3+}, 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$ 荧光粉的能级示意。

Fig. 3 (a, b) Photoluminescence emission spectra of $LiY_{5.97-x}O_5(BO_3)_3: xBi^{3+}, 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$ (x=0, 0.06), (c) excitation spectrum of $LiY_{5.91}O_5(BO_3)_3: 0.06Bi^{3+}, 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$ monitored at 615 nm, fluorescence decay curves of $LiY_{5.97-x}O_5(BO_3)_3: xBi^{3+}, 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$ (x=0, 0.06): (d) excitation at 340 nm and monitoring at 500 nm; (e) excitation at 340 nm and monitoring at 615 nm. (f) temperature-dependent emission spectra of $LiY_{5.91}O_5(BO_3)_3: 0.06Bi^{3+}, 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$, and (g) schematic energy-level diagram in $LiY_{5.91}O_5(BO_3)_3: 0.06Bi^{3+}, 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$.

与 $LiY_{5.97}O_5(BO_3)_3: 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$ 相比, 掺杂 Bi^{3+} 后, $LiY_{5.91}O_5(BO_3)_3: 0.06Bi^{3+}, 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$ 荧

光粉的宽带发射强度有所增强。同时, 该增强发射可在 340 nm 处获得有效激发。如图 3(b) 所示,

表 1 典型 Eu 掺杂的荧光粉发光性能对比

Table 1 Comparison of Luminescence Properties of Representative Eu-Doped Phosphors

Material	Emission wavelength range (nm)	Main emission peak (nm)	Ref.
BaLa ₂ WO ₇ : Eu	570–720	615	22
SrLa ₂ WO ₇ : Eu	570–720	615	22
Y ₂ O ₃ : Eu	580–700	618	23
Ba ₃ YGa ₂ O _{7.5} : Eu	550–715	590, 615	24
LiY ₆ O ₅ (BO ₃) ₃ : Eu	550–750	593, 613, 654	25
Ca ₉ MgLi(PO ₄) ₇ : Eu	550–725	612	26
LaOF: Eu	580–704	616	27
LiY ₆ O ₅ (BO ₃) ₃ : Eu	400–700	615	This work

Bi³⁺可通过允许跃迁 $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ 有效吸收近紫外激发能量,从而提高荧光粉对近紫外光的激发效率。除 Eu²⁺ 的宽带发射外,该宽带发射还可能包含 Bi³⁺ 发光中心的贡献。因此, Bi³⁺ 的引入不仅提高了荧光粉的整体发光强度,而且改善了可见光区域发射光谱的连续性,有利于宽带白光的产生。图 3(c) 为监测 Eu³⁺ 在 615 nm 发射获得的激发光谱。在 250–400 nm 范围内可观察到较强的宽带激发,其中约 340 nm 处的激发强度最高,推测是 Bi³⁺ 和 Eu²⁺ 对近紫外光具有较强的吸收能力。此外,在 395 nm 和 465 nm 附近仍可观察到 Eu³⁺ 的特征激发峰,分别对应于 $^7F_0 \rightarrow ^5L_6$ 和 $^7F_0 \rightarrow ^5D_2$ 跃迁。

为进一步考察 Bi³⁺ 引入后 Eu 相关发光过程的动力学行为,对样品进行了荧光寿命测试,结果如图 3(d) 和图 3(e) 所示。荧光衰减曲线均可采用三指数函数拟合:

$$I = I_0 + A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + A_3 \exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right) \quad (1)$$

其中 I_0 和 I 分别为时间 0 和时间 t 时的发光强度, τ_1 , τ_2 和 τ_3 分别对应快衰减组分,中间衰减组分和慢衰减组分, A_1 , A_2 和 A_3 分别为相应的拟合振幅。平均寿命 τ 可以使用以下公式计算:

$$\tau = \frac{A_1\tau_1^2 + A_2\tau_2^2 + A_3\tau_3^2}{A_1\tau_1 + A_2\tau_2 + A_3\tau_3} \quad (2)$$

如图(d)所示,未掺 Bi³⁺ 样品中 500 nm 处的平均荧光寿命 τ_{eu} 为 13.0780 μ s,而引入 Bi³⁺ 后其平均荧光寿命 $\tau_{bi eu}$ 缩短至 12.0400 μ s。进一步根据供体荧光寿命的变化,可计算 Bi³⁺ 引入后的表观能量传递效率:

$$\eta_{ET} = 1 - \frac{\tau_{eu}}{\tau_{bi eu}} \quad (3)$$

由此计算得到表观能量传递效率 η_{ET} 约为 7.94%。500 nm 处荧光寿命的缩短表明, Bi³⁺ 引入

后 Eu²⁺ 激发态的衰减过程发生了变化,体系中可能出现了新的激发能量耗散通道。进一步地,图 3(e) 给出了 615 nm 处 Eu³⁺ 特征发射的荧光衰减曲线。未掺 Bi³⁺ 样品中 Eu³⁺ 的平均荧光寿命为 1328.4751 μ s, Bi³⁺ 共掺杂后增加至 1343.2836 μ s。推测 Bi³⁺ 引入后 Eu³⁺ 相关激发态的衰减动力学同样发生了变化。结合 500 nm 处发射寿命的缩短,可以进一步推测 Bi³⁺ 的引入对 Eu 相关激发态之间的能量弛豫过程产生了影响, Eu²⁺ 与 Eu³⁺ 之间可能存在一定程度的能量耦合或迁移过程。^[28-29]

基于上述光谱与寿命结果,进一步构建了 Bi³⁺/Eu²⁺/Eu³⁺ 共掺杂体系的能级结构及可能的能量传递路径,如图 3(g) 所示。在 340 nm 近紫外光激发下, Bi³⁺ 可由基态 1S_0 跃迁至激发态 3P_1 , 随后通过能量弛豫过程向低能级跃迁,并可能与 Eu²⁺ 和 Eu³⁺ 发光中心之间发生能量交换。其中, Eu²⁺ 激发态经 $4f^65d^1 \rightarrow 4f^7$ 允许跃迁产生约 420–550 nm 的宽带发射; Eu³⁺ 经激发后弛豫至 5D_0 能级,并通过 $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$, 7F_2 , 7F_3 和 7F_4 跃迁分别产生约 590、615、650 和 700 nm 的特征发射。图 3(g) 中的箭头表示基于上述光谱与寿命结果提出的可能能量传递路径,用于示意 Bi³⁺、Eu²⁺ 和 Eu³⁺ 之间潜在的能量迁移与弛豫关系。

图 3(f) 为 LiY_{5.91}O₅(BO₃)₃: 0.06Bi³⁺, 0.03Eu²⁺, Eu³⁺ 荧光粉在 318–408 K 温度范围内的变温发射光谱。随着温度升高,荧光粉的发射强度逐渐降低,表明材料存在一定程度的热猝灭现象。然而,不同温度下发射光谱的整体谱形及各发射峰位置基本保持不变,说明热猝灭并未对其发射特性产生明显影响。即使在 408 K 时,样品仍保持较高的发射强度和完整的发射光谱,表明该荧光粉具有良好的热稳定性和较强的抗热猝灭能力。综上所述, LiY_{5.91}O₅(BO₃)₃ 中 Bi³⁺, Eu²⁺ 和 Eu³⁺ 的协同发

光实现了近紫外激发下的宽带发射和稳定输出。该荧光粉具有较宽的可见光谱覆盖范围,在白光LED领域具有良好的应用前景。

3.3 H-TENG 结构与原理

图4(a)为所制备圆盘式H-TENG的结构示意图,其主要由转子和定子组成。转子采用3D打印圆盘作为基体,并在其表面嵌入FEP薄膜,作为接

触起电过程中的负性摩擦材料。定子由叉指铝电极及预设导线构成,电极表面均匀覆盖NaCl/PVA复合薄膜。该NaCl/PVA复合薄膜不仅作为正性摩擦层,而且兼具湿度响应功能,可实现器件输出信号随环境湿度变化的调控。为进一步阐明器件的工作机理,图4(b)示意了H-TENG运行过程中表面电荷分布的演变及静电感应过程^[30]。

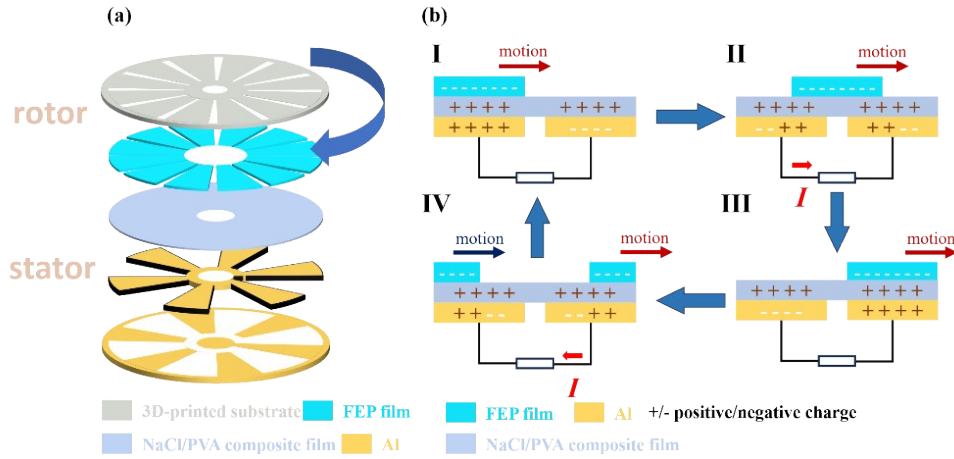


图4 (a)基于NaCl/PVA复合薄膜的H-TENG结构示意图;(b)器件工作原理示意图。

Fig. 4 (a) Schematic illustration of the structure of the NaCl/PVA composite film-based humidity-responsive TENG, and (b) schematic illustration of its working mechanism.

在初始状态(I)下,FEP薄膜与左侧叉指电极区域完全重叠,并与NaCl/PVA复合薄膜保持充分接触。由于FEP与NaCl/PVA之间存在电子亲和能力差异,在接触起电过程中,电子由NaCl/PVA层转移至FEP表面,使FEP表面积累等量负电荷,而NaCl/PVA表面则保留相应的正电荷。同时,在静电感应作用下,底部叉指电极表面的感应电荷发生重新分布。此时,整个系统处于静电平衡状态,外电路中无电子流动。

当转子逆时针旋转时,FEP薄膜逐渐由左侧电极区域向右侧电极区域移动,与左侧电极的重叠面积不断减小,原有静电平衡被打破。为恢复静电平衡,电子经外电路由右侧电极流向左侧电极,从而产生输出电流,如状态(II)所示。随着转子继续旋转,当FEP薄膜完全覆盖右侧电极区域时,转移电荷达到最大值,系统重新建立静电平衡,此时外电路中的电流逐渐减小至零,对应状态(III)。

随后,转子继续旋转,FEP薄膜与右侧电极区域的重叠面积逐渐减小,同时下一块FEP薄膜逐渐覆盖左侧电极区域。为恢复静电平衡,电子经外电路由左侧电极流向右侧电极,如状态(IV)所示。当FEP薄膜完全脱离右侧电极区域,此时,下

一块FEP薄膜恰好完全覆盖左侧电极区域,器件恢复至初始状态(I),完成一个工作循环。

因此,在转子连续旋转过程中,FEP薄膜与NaCl/PVA复合薄膜之间的周期性相对运动持续调控界面电荷分布,并驱动电子在两组电极之间经外电路发生周期性迁移,从而产生稳定的交流电输出。考虑到环境湿度变化会显著影响NaCl/PVA摩擦层的电学性质,为进一步分析水分对摩擦层电学性质的影响,在薄膜面积和厚度一致的条件下,对纯PVA和NaCl/PVA薄膜在干燥及充分吸水状态下的电阻进行了对比测试,结果如表2所示。纯PVA薄膜的电阻由干燥状态下的2.1 MΩ降低至充分吸水后的10.1 kΩ,表明水分的引入能够显著降低PVA薄膜的电阻,说明PVA自身的吸水特性会明显改变其电学性质。相比之下,NaCl/PVA薄膜的电阻由干燥状态下的26.5 kΩ进一步降低至充分吸水后的77.6 Ω,且在两种状态下均明显低于纯PVA薄膜。该结果表明,除PVA自身吸水作用外,NaCl的引入进一步增强了薄膜的电荷传输能力。水分与NaCl组分共同促进了薄膜电学性质的变化,从而有利于摩擦层表面电荷的耗散。

表 2 纯 PVA 和 NaCl/PVA 薄膜在干燥及浸水状态下的电阻变化

Table 2 Resistance changes of pure PVA and NaCl/PVA films under dry and water-soaked conditions.

Film material	Resistance in the dry state	Resistance in the wet state	Resistance reduction factor
Pure PVA	2 M Ω	10.1 k Ω	207
NaCl/PVA	26.5 k Ω	77.6 Ω	341

因此,该器件不仅能够实现机械能向电能的转换,还具备环境湿度传感功能。上述特性为湿度传感与光学信号输出的一体化集成提供了基础,并进一步实现了兼具环境湿度状态感知和白

光显示功能的双功能光电系统。

3.4 H-TENG 性能测试

图 5(a)H-TENG 电学性能测试装置示意图,插图展示了不同湿度条件下 NaCl/PVA 摩擦层表面

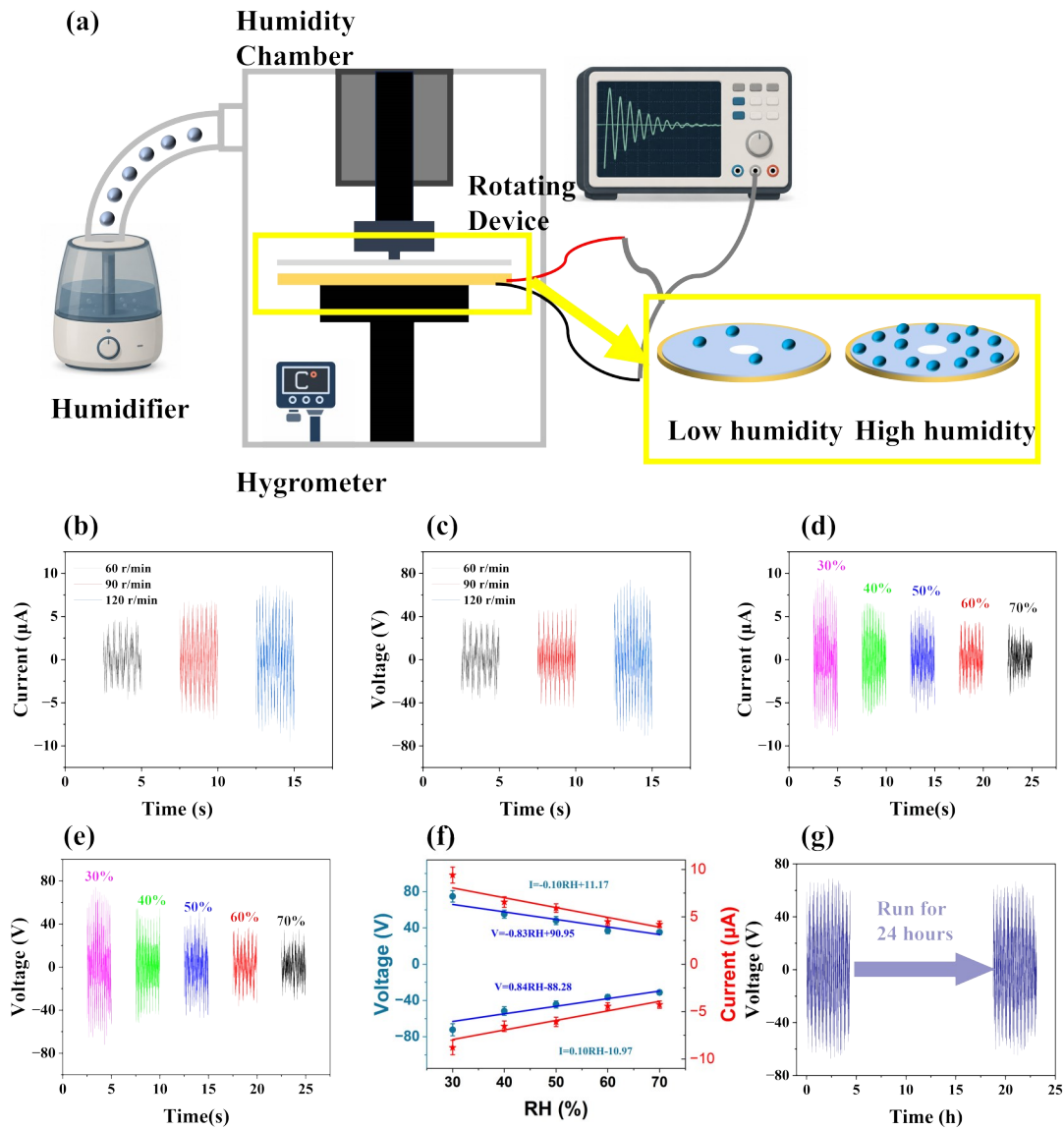


图 5 (a)H-TENG 电学性能测试装置;(b,c)相对湿度为 30% 时,不同转速下器件的 V_{OC} 和 I_{SC} ;(d,e)转速为 120 r/min 时,器件 V_{OC} 和 I_{SC} 随相对湿度的变化;(f)电学输出与相对湿度的拟合关系。数据点表示平均值,误差棒表示标准差;(g)器件的循环稳定性。

Fig. 5 (a) Experimental setup for electrical characterization of the H-TENG, (b, c) V_{OC} and I_{SC} measured at different rotational speeds under 30% relative humidity, (d, e) humidity-dependent V_{OC} and I_{SC} measured at 120 r/min, (f) fitted relationships between electrical output and relative humidity. Data points represent the mean values, and error bars represent the standard deviations, and (g) cycling stability of the TENG.

状态。图 5(b)和(c)分别给出了相对湿度为 30% 条件下,不同转速对应的短路电流(I_{sc})和开路电压(V_{oc})。随着转速由 60 r/min 提高至 120 r/min,器件的 V_{oc} 和 I_{sc} 均呈现增大的趋势,同时单位时间内输出脉冲数明显增加。这主要是由于转速升高加快了摩擦层之间的周期性接触-分离过程,使单位时间内接触起电和电荷转移次数增加,从而提高了器件的电学输出性能。此外,工作频率的提高加快了静电感应作用下的电荷重新分布,使输出信号幅值进一步增大,输出脉冲间隔相应减小。

图 5(d)和(e)分别为转速固定为 120 r/min 时, V_{oc} 和 I_{sc} 随相对湿度变化的测试结果。随着相对湿度由 30% 增加至 70%, V_{oc} 和 I_{sc} 均逐渐降低,表明环境湿度对 NaCl/PVA 摩擦层的电荷保持能力和离子传输行为具有显著影响。为进一步定量评价器件的湿度响应性能,图 5(f)给出了电学输出参数与相对湿度之间的拟合关系。在 30%-70% 相对湿度范围内,两种电学输出参数均随相对湿度变化呈现良好的响应关系。

在低湿度条件下,NaCl/PVA 复合薄膜表面仅吸附少量水分子,由摩擦界面产生的电荷能够得到有效保持。同时,复合薄膜内部离子迁移受到抑制,由摩擦层之间建立的静电势差得以稳定维持。因此,器件表面能够保持较高的电荷密度,从而获得较高的 V_{oc} 和 I_{sc} 。

随着环境湿度升高,PVA 分子链中的亲水性羟基(-OH)持续吸附空气中的水分子,并逐渐在材料表面形成吸附水层。同时,NaCl 在高湿环境下可能发生部分溶解与电离,产生可迁移的 Na^+ 和 Cl^- ,从而提高复合薄膜表面的离子电导率。增强的离子迁移有助于表面电荷耗散提供了更多传输路径,加速了电荷中和过程。此外,吸附水层的形成降低了摩擦界面的有效接触面积,并削弱了接触起电效率,使界面产生的摩擦电荷密度进一步降低。因此,随着相对湿度的增加,器件的 V_{oc} 和 I_{sc} 均逐渐减小,验证了该器件具有良好的湿度响应性能。

湿度灵敏度(S)由输出信号与相对湿度拟合曲线的斜率计算,其计算公式为

$$S = \frac{\Delta X}{\Delta RH} \quad (4)$$

式中, X 表示电学输出参数 V_{oc} 或 I_{sc} , RH 表示相对湿度。根据线性拟合结果,器件的开路电压和短路电流灵敏度分别为 -0.84 V/% 和 -0.10 μA /%。

其中,负号表明随着环境相对湿度的增加,器件的开路电压和短路电流均呈下降趋势。上述结果说明,器件电学输出与环境湿度之间具有良好的相关性,表明 H-TENG 具有良好的湿度响应性能。

图 5(g)为 H-TENG 连续运行 24 h 的稳定性测试结果。连续运行 24 h 后,器件的输出信号仍保持在初始水平附近,未观察到明显的性能衰减,表明 H-TENG 在 24 h 连续运行过程中具有良好的输出稳定性。综合上述结果可知, H-TENG 的电学输出对环境湿度具有明显的依赖性。其湿度依赖性的电学输出主要源于 NaCl/PVA 复合层中水分子吸附、离子迁移以及电荷耗散等过程的共同作用。因此,该器件可为环境湿度状态感知及传感-显示一体化器件的设计提供一种实现途径。

3.5 白光 LED 及传感-显示一体化应用

为验证 $LiY_{5.91}O_5(BO_3)_3: 0.06Bi^{3+}, 0.03Eu^{2+}, Eu^{3+}$ 荧光粉的实际应用性能,将荧光粉与 PDMS 混合后封装于 340 nm 近紫外 LED 芯片表面,制备得到白光 LED 器件。图 6(a)展示了器件在低湿度和高湿度条件下的光谱。两种湿度条件下均可观察到宽带发射,其发光来源于 Bi^{3+} 、 Eu^{2+} 和 Eu^{3+} 之间的协同发光作用。器件在不同湿度状态下均能够保持基本一致的白光发射特征,同时呈现出可辨识的发光强度差异。图 6(a)插图进一步给出了器件在低湿度和高湿度条件下的实物发光照片。低湿度与高湿度条件下存在可辨识的发光强度差异,但仍保持一致的白光发射特性。图 6(b)所示器件的 CIE 色坐标为 (0.35165, 0.35993), 位于白光区域。基于器件的发射光谱及 CIE 色度坐标进一步计算得到,其相关色温(CCT)约为 4800 K,色纯度约为 13.5%,显色指数 R_a 约为 82。其中,CIE 色坐标 (0.35165, 0.35993) 位于白光区域,4800 K 的相关色温表明器件呈现中性偏冷的白光色调;色纯度约为 13.5%,进一步反映了其色品坐标接近白光区域的特征;同时, R_a 约为 82,表明器件具有较好的整体显色能力。综合上述参数,该器件表现出良好的白光色品特征和显色性能。

图 6(c)为集成光电系统的工作原理示意图。在外部机械激励作用下, H-TENG 将机械能转换为电能。器件在不同湿度状态下均能够保持基本一致的白光发射特征,同时呈现出可辨识的发光强度差异。其中,NaCl/PVA 摩擦层赋予器件湿度响应特性,使 H-TENG 的电学输出能够用于环境

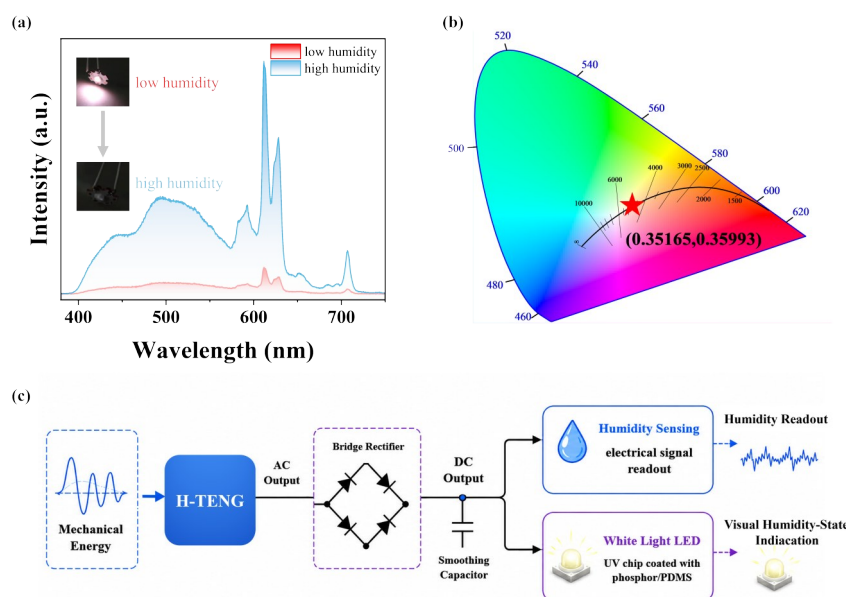


图6 (a)所制备白光LED器件在低湿度和高湿度条件下的光谱,插图为器件在高湿度和低湿度条件下的工作照片;(b)白光LED器件的CIE色坐标;(c)集成湿度传感与白光显示双功能光电系统示意图。

Fig. 6 (a) Luminescence spectra of the fabricated white-light LED device measured under low- and high-humidity conditions, with the inset showing corresponding photographs of the operating device, (b) CIE chromaticity coordinates of the white-light LED, and (c) schematic illustration of the integrated dual-functional optoelectronic system for humidity-regulated white-light emission.

湿度状态检测;同时,H-TENG输出可进一步驱动白光LED,将不同湿度状态下的电学响应差异转化为直观的发光状态变化。因此,该器件在同一平台上集成了机械能转换、环境湿度状态检测和白光显示功能。

4 结 论

综上所述,本工作通过将H-TENG与单白光LED耦合,构建了一种集湿度传感与白光显示于一体的双功能光电系统。 $\text{LiY}_{5.91}\text{O}_5(\text{BO}_3)_3: 0.06\text{Bi}^{3+}, 0.03\text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ 荧光粉在340 nm激发下表

现出宽带可见光发射,并成功制备出CIE色坐标为(0.35165, 0.35993)的白光LED器件。基于NaCl/PVA复合薄膜的TENG在30%-70%相对湿度范围内表现出稳定的湿度响应特性,其开路电压和短路电流灵敏度分别达到-0.84 V/%和-0.10 $\mu\text{A}/\%$ 。同时,器件连续运行24 h后仍保持稳定的电学输出,表明其具有良好的运行稳定性。该研究为机械能收集、环境湿度状态感知与白光可视化显示的集成提供了一种可行的实现方案,为多功能集成光电系统及智能环境监测器件的发展提供了新的设计思路。

参 考 文 献:

- [1] YU S, ZHANG H, ZHANG J, *et al.* High-sensitivity RGO-TiO₂ humidity sensor driven by triboelectric nanogenerators for non-contact monitoring of human respiration[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 935: 168006.
- [2] GUO B, CHEN S, LUO Y, *et al.* Self-Powered Flexible Dual-Mode Humidity Sensor Enabled by Integrated TENG and Visualized Cellulose Nanocrystals[J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36: e29552.
- [3] DING Z, ZOU M, YAO P, *et al.* A triboelectric nanogenerator based on sodium chloride powder for self-powered humidity sensor[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(10): 2657.
- [4] JAIN S K, JOSHI A M. Humidity dependent electrical characteristics of OTFT sensor: A simulation study and sensitivity analysis[J]. *Organic Electronics*, 2026, 156: 107457.
- [5] FUJII T, TAKITA M, SUZUKI T, *et al.* Development of a Capacitive Humidity Sensor Based on Polyimide/Carbon Nano-

- tube (CNT) Composite Thin Films with High CNT Content[J]. *Sensors and Materials*, 2026, 38(1): 137.
- [6] ZHONG J, DING X, LIU Q. High sensitivity and low hysteresis QC-IDE humidity sensor based on GO/Nafion hybrid film [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2026, 75: 9508812.
- [7] EJEHI F, MOHAMMADPOUR R, ASADIAN E, *et al.* Enhancement of self-powered humidity sensing of graphene oxide - based triboelectric nanogenerators by addition of graphene oxide nanoribbons [J]. *Microchimica Acta*, 2021, 188 (8): 251.
- [8] VU D L, LANH P T, NGUYEN T T, *et al.* High-Current Triboelectric Nanogenerator Based on TiO₂-Decorated PVDF Membrane via Atomic Layer Deposition for Self-Powered Humidity Sensing[J]. *Small*, 2026, 22: e12870.
- [9] BELAL M A, HAJRA S, BAYOUMY A M, *et al.* Transformation of rusted iron into an IDE-based sensor for ethanol detection and self-powered humidity sensing[J]. *Journal of Materiomics*, 2026, 12(4): 101188.
- [10] LIU H, WANG H, FAN Y, *et al.* A triboelectric nanogenerator based on white sugar for self-powered humidity sensor [J]. *Solid-State Electronics*, 2020, 174: 107920.
- [11] YANG Y, AKHTAR F, IQBAL S, *et al.* Sustainable Triboelectric Nanogenerator from Abalone Shell Powder for Self-Powered Humidity Sensing[J]. *Sensors*, 2025, 25(24): 7584.
- [12] IPPILI S, JELLA V, PERAM S P, *et al.* Dielectric Engineering of ZnO@ ZIF-8 for High-Performance Triboelectric Nanogenerators and Self-Powered Humidity Sensors[J]. *Small Methods*, 2026, 10(5): e00746.
- [13] KIM S, AKHTAR F, IQBAL S, *et al.* Sustainable Cellulose-and Pectin-Rich Triboelectric Nanogenerator for Mechanical Energy Harvesting and Self-Powered Humidity Sensing[J]. *Polymers*, 2025, 17(23): 3130.
- [14] XIONG L, YANG T, CONG R. Achieving single-phase white light emission by utilizing the sensitization effect of Bi³⁺ to Eu³⁺ and Tb³⁺ in LiY₆O₅(BO₃)₃[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2025, 350: 125504.
- [15] WOŹNY P, DU P, ZHENG T, *et al.* Pressure - Driven Phase Transition Unlocking Unique Eu²⁺ Luminescence in Li₂Si₂SiO₄ for Optical Sensing and White-LEDs[J]. *Advanced Science*, 2026: e75887.
- [16] LIU J, WANG Z, LI X, *et al.* Coexistence mechanism of Eu²⁺/Eu³⁺ ions in YAl₃(BO₃)₄: Crystal structure, luminescence property, and substitution defects[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, 102(11): 6760.
- [17] ZHAO M, ZHANG Y, HU Q, *et al.* Eu²⁺ Luminescence Stabilization at Ln³⁺ Sites Promoted by Interstitial Alkali-Metal Defects[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2026, 20(10): e02558.
- [18] YUAN H, MA H, WANG G, *et al.* Tunable luminescence in SrLaGaO₄: Bi³⁺/Eu³⁺ phosphors via Bi³⁺ → Eu³⁺ energy transfer[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2025, 1321: 139776.
- [19] KIM D, KIM T H, HONG T E, *et al.* Highly Luminous Ba₂SiO_{4.8}N_{2/38}: Eu²⁺ Phosphor for NUV-LEDs: Origin of PL-Enhancement by N³⁻-Substitution[J]. *Materials*, 2020, 13(8): 1859.
- [20] DAI H, WANG X, LIU Z, *et al.* A long-term stable zero-thermal-quenching blue-emitting phosphor for sustainable and human-centric lighting[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12(31): 11907.
- [21] WEI D, SEO H J, LIU Y, *et al.* Reveal luminescence differences via comparative studies of dynamic spectra in Eu³⁺-activated BaLa₂WO₇ and SrLa₂WO₇ phosphors[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(5): 7534.
- [22] WU Y, JIN G, LIU Z, *et al.* Synthesis and luminescence of spherical Y₂O₃: Eu³⁺ and Y₂O₃: Eu³⁺/Bi³⁺ particles[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2016, 27(6): 6188.
- [23] WEI S, LI Z, LYU Z, *et al.* Energy transfer mediated single-phased white light emission in Bi³⁺-Eu³⁺ codoped Ba₃YGa₂O_{7.5} for WLED[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 923: 166419.
- [24] FAN X, XU L, LIU W, *et al.* Energy transfer in dual-emission LiY₆(BO₃)₃O₅: Bi³⁺, Eu³⁺ phosphors for temperature sensing applications[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(18): 32583.
- [25] CAO R, LIANG R, LI L, *et al.* Luminescence properties, tunable emission and energy transfer of Ca₉MgLi(PO₄)₇: Bi³⁺/Eu³⁺ phosphor[J]. *Journal of Luminescence*, 2022, 252: 119397.
- [26] HE Y, CHEN N, DU G. Synthesis of LaOF: Eu³⁺ Nanoparticles with strong luminescence enhanced by organic ligands [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014, 97(6): 1931.
- [27] DING Y, BU R, ZENG X, *et al.* Selective transition manipulation and polarized luminescence in Sr₂Ca_{0.9}Eu_{0.05}Li_{0.05}MoO₆ double perovskite phosphor[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2026, 359: 127941.
- [28] GUO L, LI T, ZHU C, *et al.* Tunable luminescent chromaticity of CaZnOS: Bi³⁺, Eu³⁺ with white emitting based on ener-

- gy transfer[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 905: 164262.
- [29] MAGGAY I V B, LIN P C, LIU W R. Enhanced luminescence intensity of novel red-emitting phosphor-Sr₃Lu₂(BO₃)₄: Bi³⁺, Eu³⁺ via energy transfer[J]. *Journal of Solid State Lighting*, 2014, 1(1): 13.
- [30] YE Y, GUO J, ZHOU J, *et al.* Mechanoluminescence ZnS/CaZnOS: Mn²⁺/PVC composite film-based triboelectric nano-generator for energy harvesting and intelligent sensing[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 510: 161604.



朱世雄(2001-),男,江苏南京人,硕士研究生,2024年于常州大学获得学士学位,主要从事智能传感器件的研究。
E-mail: 1224025336@njupt.edu.cn



王祥夫(1979-),山东邹城人,博士,教授,2012年博士毕业于南京航空航天大学,主要从事智能传感电子器件与控制系统和基于机器学习的传感器件结构与性能的预测与改进的研究。
E-mail: xfwang@njupt.edu.cn



颜晓红(1964-),男,湖南衡阳人,博士,教授,1997年博士毕业于中国科学院固体物理研究所,主要从事光学功能材料及其新能源应用和纳功能器件及物理的研究。
E-mail: yanxh@njupt.edu.cn