

一体化摩擦电自供能气湿传感器研究进展

刘勃豪, 谢光忠, 段再华, 袁 震, 蒋亚东, 太惠玲*

(电子科技大学光电科学与工程学院, 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川成都 611731)

摘要: 气湿传感器在环境检测、工农业生产以及医疗健康等领域应用甚广, 然而主流的电阻、电容、光电气湿传感器需要外部供能工作, 一方面电池的频繁更换与维护增加了泄露引起的环境污染, 另一方面传感器对外界能源过于依赖将限制其在缺乏能源的场合中正常工作。鉴于此, 通过赋予气湿传感器自发收集外界环境能量并转化成电能的能力, 以实现长期自主工作的自供能气湿传感器的理念应运而生。摩擦纳米发电机(TriboElectric NanoGenerator, TENG)作为一种新型能量俘获装置, 由于其成本低、可结构设计且能量转换效率高等优势, 在机械能收集与自供能传感器等领域应用广泛。进一步赋予TENG外界信息感知的能力, 可实现单一器件兼具能量收集与气体敏感的功能, 这种一体化摩擦电自供能传感器是目前传感器领域发展的一个热点方向。本文对一体化摩擦电自供能气湿传感器的研究现状与最新进展进行了综述, 可从以下三个方面进行概括。(1)一体化摩擦电气湿传感器工作原理与气敏机理, 并基于TENG的等效电路模型论述了影响敏感性能的参数—介电层摩擦电荷密度、介电层介电常数与电极层电导率;(2)一体化摩擦电气体传感器的研究进展, 根据检测对象将其主要分为氨气(Ammonia, NH_3)、乙醇以及其他有机挥发化合物(Volatile Organic Compound, VOC)气体传感器, 介绍了其在呼出气、食品变质以及尾气排放检测场合的应用;(3)一体化摩擦电湿度传感器的研究进展, 根据湿度对输出电信号幅值影响的不同将其主要分为电信号下降型传感器与电信号上升型传感器, 介绍了其在非接触开关、皮肤湿度与尿不湿检测场合的应用。最后对一体化摩擦电气湿传感器的研究现状与面临的问题挑战进行了总结, 并对其未来的发展方向进行了展望, 可为相关研究提供参考。

关键词: 摩擦纳米发电机; 一体化; 自供能; 敏感机理; 气体传感器; 湿度传感器

基金项目: 国家自然科学基金(No.62225106, No.62301114, No.62101105)

中图分类号: TM619; TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2024)02-0660-18

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20231003

Research Progress on Integrated Triboelectric Self-Powered Gas and Humidity Sensors

LIU Bo-hao, XIE Guang-zhong, DUAN Zai-hua, YUAN Zhen, JIANG Ya-dong, TAI Hui-ling*

(School of Optoelectronic Science and Engineering, State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: Gas and humidity sensors are widely applied in various fields such as environmental detection, industrial and agricultural production, and medical health. However, the mainstream reported resistive, capacitive, and optoelectric gas/humidity sensors require external energy supply, not only causing the environment pollution from the battery leakage after frequently changed and maintained, but also restricting the sensor's operation under the energy shortage circumstance. As one of the novel energy harvesting devices, triboelectric nanogenerators (TENG) have been widely applied in mechanical energy harvesting and self-powered sensors owing to the merits of low-cost, designable structure, and high energy conversion efficiency. Furthermore, researchers have endowed TENG with the ability of acquiring information from the outside, which is expected to integrate the energy collection and sensing unit into one device. The above-mentioned integrated triboelectric self-powered sensor is one of the hottest topics in the sensing technique. This article provides a review of the current research status and latest progress of integrated triboelectric self-powered gas/humidity sensors, which can be summarized from the following three aspects. (1) The working principle and gas sensing mechanism of integrated triboelectric

gas/humidity sensors. Meanwhile, parameters (triboelectric charges density and dielectric constant of dielectric layer, conductivity of electrode layer) that affect the sensing performances are discussed based on TENG's equivalent circuit model. Triboelectric charges density can be effectively influenced based on the screening effect of the condensed thin film on the friction surface or the electrons transfer between the friction surface and the gas/water molecules, resulting in the increased/decreased equivalent triboelectric charges; Output changes based on dielectric constant of the dielectric layer (also the triboelectric layer) usually occur in the situation where there is a significant difference in the dielectric constant between the test sample and the dielectric layer. However, the limited gas/water adsorption causes little changes in dielectric constant, resulting in the poor sensing response; Variations of the output changes of TENG based on the resistances change of the sensing electrode can be attributed to the Kirchhoff voltage divider law, where the voltage received by each load is directly proportional to its impedance in a series circuit. However, owing to the high impedance of the air layer and dielectric layers, significant resistance/impedance changes of sensing electrodes during sensing period are demanded, restricting the material selection. (2) The research progresses of integrated triboelectric gas sensors (TGS) are mainly divided into ammonia (NH_3), ethanol, and other volatile organic compound (VOC) gas sensors according to the detection subjects. Furthermore, the applications of TGS in detecting exhaled gas, food spoilage, and exhaust emissions are introduced. (3) Based on the different effects of humidity on the amplitude of output electrical signals, the research progresses of integrated triboelectric humidity sensors (THS) are mainly divided into the sensors with the performances of humidity induced signal drops and rises. Furthermore, the applications of THS in non-contact switches, skin humidity and diaper detection are introduced. Finally, the research status and challenges of TGS and THS are summarized. Meanwhile, the prospects of the future development are illustrated, providing references for the future research of integrated triboelectric self-powered gas/humidity sensors.

Key words: triboelectric nanogenerator; integrated; self-powered; sensing mechanism; gas sensor; humidity sensor

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62225106, No.62301114, No.62101105)

1 引言

气湿传感器是一种能够将环境中的气体种类/浓度或湿度大小按一定对应关系转换成可视信号(电、光信号等)的器件,在环境检测、工农业生产、航空航天、电子医疗等领域应用广泛^[1]. 自从60年前 Wickens 和 Hatman 等人利用气体在电极表面的氧化还原反应机制设计出首个气体传感器以来,气湿传感器的发展进入了飞速阶段^[2]. 截至目前,已有大量基于不同工作原理的气湿传感器被报道,例如基于气体/水汽在敏感材料表面释放或夺取电子导致其导电能力变化的电阻式传感器^[3,4],基于吸附引起敏感材料介电常数变化的电容式传感器^[5],基于吸附引起敏感材料质量变化的质量型传感器^[6,7],基于特定气体含量变化引起光学性能(如透过率、折射率等)变化的光学传感器^[8,9],基于气体与具有离子导电特性的固态物质相互作用固体电解质式传感器^[10,11]等. 然而,上述主流的气湿传感器大部分需要外部电源供能或提供相应工作条件(如高温、谐振频率等),在不利于节能的同时也不利于物联网中多传感器节点同时工作,徒增使用维护成本. 如能为传感器配备小型能量收集与管理模块,使整套装置自身实现能量的“自给自足”甚至为其他高能耗的设备供给能量,将极大减少分布广泛的传感器节点集群工作所需要的庞大能源消耗与长距离能量传输带来的损耗,有利于缓解目前日益严重的能源危机.

由于器件朝着集成化与小型化发展的趋势,传感器节点的能耗不断降低,导致收集外界微能源驱动传感器工作的构想成为了可能. 相较于太阳能获取受限于天气、时间等因素,选择收集生命体或环境中的低频机械能更为可靠^[12]. 2012年,佐治亚理工学院的王中林团队发明了摩擦纳米发电机(TriboElectric NanoGenerator, TENG),这是一种基于摩擦起电与静电感应耦合的新型能量收集技术,其最大的优势在于可以通过结构设计适用于绝大多数场合的机械能收集与转换^[13]. 此外, TENG 具有制备简单、成本低廉、可柔性、可集成等优点,作为供能装置在自供能传感器领域广泛应用. 以摩擦电自供能气湿传感器为例,基于 TENG 在其中起到的作用不同分成了两个研究方向. 一种是将 TENG 直接与阻抗型(电阻或电容)气湿传感器串联^[14,15],当传感器的阻抗受环境气湿浓度与种类影响发生变化时,基于基尔霍夫分压/分流定律,传感器两侧的电压/电流也会发生相应变化^[16],从而实现自供能探测. 由于 TENG 与传感器分别作为发电单元与敏感单元,整个装置被称为分离式摩擦电型自供能气湿传感器. 另一种是通过影响 TENG 的介电层或电极层的电学特性来调控输出电信号,从而赋予 TENG 自主探测周围环境气湿浓度与种类的能力,在这里 TENG 兼具发电与传感两种功能,因此被称为一体化摩擦电型自供能气湿传感器^[17,18]. 表1展示了上述两种传感器的参数对比结果,从表1中可以看出,一体化摩擦电气湿传感器尽管存在性能较差、耦合机理复杂等不足,然而其

器件集成度高、物理/化学多参量同时检测的优势有利于 未来朝着集成化、多功能方向发展。

表1 分离式与一体化摩擦电气湿传感器的参数对比

器件类型	分离式传感器	一体化传感器
基本结构	TENG与气湿传感器串联	与TENG一致
敏感机理	传感器电学性能变化+基尔霍夫分压/分流定律	介电层电容变化、电极层电导率变化等,可能涉及耦合机理
敏感性能	一般较好	一般较差
气湿敏感单元要求	需要阻抗匹配	不一定需要阻抗匹配
集成度	低	高
多参数同时检测能力	气湿传感器只能检测气湿信号	气湿传感器可以检测气湿信号以及TENG可以检测到的力学信号
长期稳定性	较好	差(敏感材料在工作时可能受磨损)

在这里,本文将围绕一体化摩擦电自供能气湿传感器展开讨论.首先介绍目前主流的发电/敏感原理,并基于TENG的基本电学模型阐述影响敏感性能的参数;然后综述摩擦电自供能传感器在气湿检测的研究进展;最后总结这类传感器的技术难点以及面临的挑战,并展望其发展前景.

2 一体化摩擦电自供能气湿传感器的结构与工作原理

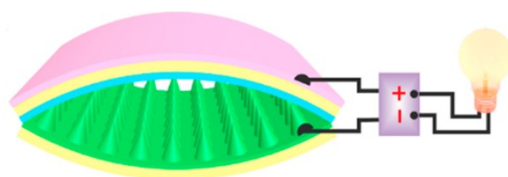
2.1 传感器的结构

一体化摩擦电自供能气湿传感器的结构与TENG一致,一般由两种不同的摩擦薄膜(介电层)与对立设置的背电极构成(单电极模式除外)^[19].不同之处在于介电层或电极至少一处具有气敏性能,为明确敏感机理一般仅赋予一处介电层^[20]或电极^[21]敏感能力,其基本结构分别如图1(a)与图1(b)所示.

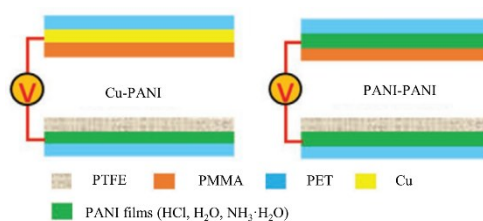
2.2 发电/敏感机理概述

一体化摩擦电自供能气湿传感器的发电机理与TENG一致,由摩擦起电与静电感应两部分构成(图1(c))^[19,22]:首先由于不同的材料的摩擦电负性不同,在两种薄膜相互接触或滑动时将会发生电荷转移,导致摩擦电负性强的薄膜表面携带负电荷,而另一侧薄膜表面将会携带等量的正电荷;当上述薄膜之间发生相对分离或正对区域面积发生变化后,由于静电感应现象会在薄膜的背电极之间产生感应电势差,此时如采用负载将电极之间相连后,电子将从一个电极流向另一个电极,形成反向电场来平衡摩擦薄膜分离产生的内建电场.重复上述的接触/滑动分离步骤,电子将会在两个电极之间往复运动,从而形成周期性的电信号.目前传感器具有四种基本工作模式^[19]:垂直接触-分离模式、水平滑动式、单电极式以及独立层式.

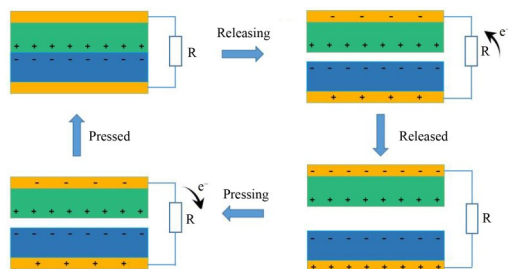
当传感器暴露在气体/湿度环境时,敏感材料会通过分子吸附引起其电学特性(导电性与介电性)变化,从而影响输出电信号的幅值.值得注意的是,由于传感器发电机理由摩擦起电与静电感应两个步骤



(a) 介电层作为敏感材料的传感器结构示意图^[20]



(b) 电极作为敏感材料的传感器结构示意图^[21]



(c) 传感器的发电机理^[22]

图1 一体式摩擦电气湿传感器的结构与基本发电原理

构成,因此介电层或电极层均可作为气敏层,甚至部分兼具一定导电性与介电性的敏感材料(如导电聚合物)可以同时作为TENG的介电层、电极层与敏感层.

2.3 影响敏感性能的参数

由于一体化摩擦电传感器内部结构可等效为一个理想电压源、一个由介电层与空气层组成的电容以及两侧电极自身的电阻/阻抗串联的电路,因此气体/湿度相互作用可能通过影响介电层表面摩擦电荷密度(与理想电压源的输出幅值相关)、介电层介电常数以及电极层电阻/阻抗来改变最终输出信号的大小.下面分别对上述三种主流的调控方式进行阐述.

2.3.1 调控介电层的摩擦电荷密度

根据王中林团队对 TENG 的电学模型推导^[19],介电层表面的摩擦电荷密度与传感器的输出开路电压成正比关系,因此针对介电层表面摩擦电荷密度调控是最为直接的一种方式. 目前报道的理论模型主要有以下两种. 一种认为气体/湿度分子的吸附将会在介电层表面形成一层相应的膜,从而屏蔽/耗散介电层表面生成的摩擦电荷(图 2(a)). 该机理往往适用于较高浓度的气体/湿度检测,如水汽、高浓度乙醇分子^[23-25]等;另一种是认为气体/湿度分子的吸附与介电敏感层表面发生电子相互授受^[20,26],或水分子电离产生的 H⁺与 OH⁻被介电层吸附^[27],从而在介电层表面形成电子/离子积累或耗尽. 由于电子/离子与摩擦电荷均携带相应电量,因此会产生类似于屏蔽/增强介电层表面电荷的效果(图 2(b)). 尽管上述两种理论模型参照了摩擦电学与半导体式气体传感器的机理解释,具有一定的理论基础,但是第一种理论模型难以应用在检测低浓度气体的场合中,且无法解释气体分子的选择性. 第二种理论模型目前适用于绝大多数介电层作为摩擦材料与敏感材料的场合^[20,26-32],但是否具有一定普适性还需要进一步探索.

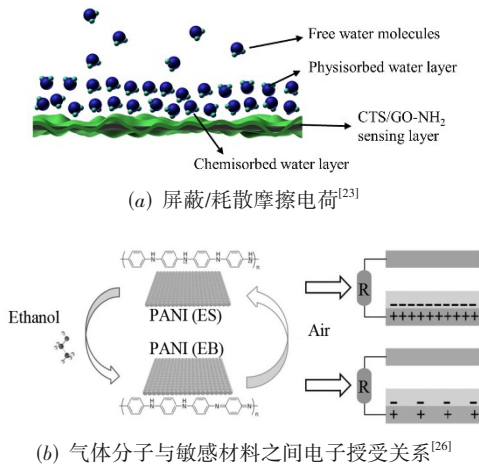
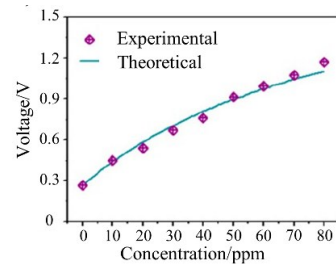


图 2 基于摩擦电荷调控的摩擦电传感器气湿敏感机理

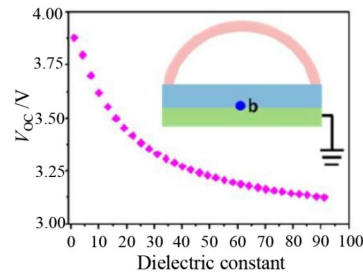
2.3.2 调控介电层的介电常数

由于 TENG 的等效电路模型中包含介电层电容,相较于对立面积与分离距离,气体分子吸附更容易引起介电层介电常数的改变,从而影响整个传感器的输出^[33]. 相关研究成果首先由电子科技大学苏元捷和加州大学洛杉矶分校陈俊课题组报道. 在该工作中通过结合吸附平衡方程、麦克斯韦方程以及 TENG 的基本物理模型,以介电常数变化为桥梁将气体吸附与摩擦电传感器输出电压变化联系在一起,构建了二氧化氮(NO₂)浓度与传感器输出电压之间的定量关系式,并

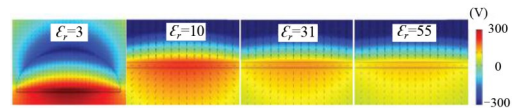
通过有限元仿真进一步验证了上述关系,如图 3(a)~(c)所示^[34]. 本课题组研究发现利用介电常数变化可以定性解释传感器的湿敏性能以及高湿条件下气敏性能,并通过测试介电层敏感材料的容值变化间接验证了摩擦电型传感器的变化规律^[35]. 尽管针对介电层介电常数的仿真与实测可为上述机理模型的构建提供理论支持,但一方面气体/湿度吸附对介电常数的变化有限,导致传感器响应较小,另一方面为尽可能提升敏感性能,敏感材料的介电常数需要与目标气体/湿度相差较大且具有良好的吸附能力,具有一定的局限性.



(a) 气体浓度与输出电压的关系——理论计算与实测结果之间的对比^[34]



(b) 介电层介电常数与其中心电势之间的关系^[34]



(c) 介电层介电常数大小对应的电势分布有限元仿真结果^[34]

图 3 基于介电常数调控的摩擦电传感器气湿敏感机理

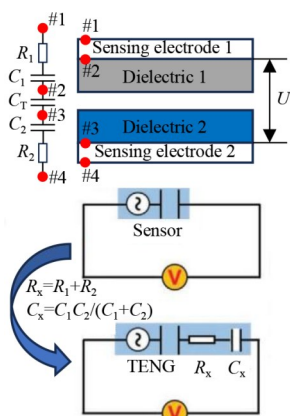
2.3.3 调控电极的电阻或阻抗

一般而言, TENG 的电极导电性良好的金属或碳材料,其内阻近乎为 0,因此在理想情况下往往忽略电极本身带来的影响. 但实际情况下部分电极(如导电聚合物等)本身电阻/阻抗较大,根据基尔霍夫电压定律会有部分电压分配在电极处,导致实际输出电压会有所降低(图 4(a))^[21]. 因此,如果找到一种导电能力在湿度/气体氛围下变化较大的敏感电极,将可以通过分压

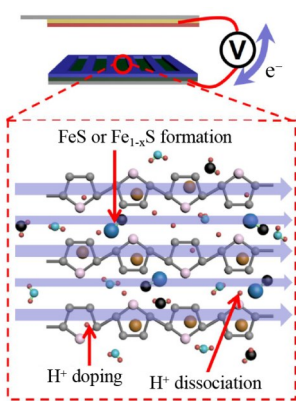
定律调控传感器输出电压. 苏州大学文震、孙旭辉团队研究了聚苯胺(Polyaniline, PANI)作为敏感电极时其阻抗值与摩擦电传感器输出幅值的关系,发现敏感电极在氨气(NH_3)环境下阻抗上升,基于分压定律会导致摩擦电传感器两端的输出电压相应减小^[21];本课题组研究了导电聚合物聚吡咯(Polypyrrole, PPy)与过渡金属盐复合材料作为摩擦电传感器敏感电极时对硫化氢气体的响应规律,其中过渡金属盐可以与硫化氢(H_2S)之间发生反应生成导电性更好的过渡金属硫化物,导致PPy基敏感电极阻抗下降,相应的摩擦电传感器输出电压上升(图4(b))^[36]. 上述模型尽管通过敏感材料阻抗变化与分压定律相结合得到了合理的解释,但一方面摩擦薄膜可以与对立侧摩擦薄膜的背部敏感电极之间产生非接触型摩擦起电,因此无法完全排除敏感电极表面的摩擦电荷变化对传感器气敏性能的影响;另一方面为尽可能增大响应,敏感电极需要在工作时具备较大的电阻/阻抗变化,这对敏感材料的选择提出了更高的要求.

2.3.4 小结

影响一体化摩擦电传感器敏感性能的参数较多,



(a) 基于敏感电极分压定律的敏感机理^[21]



(b) 基于敏感电极阻抗变化的硫化氢气敏机理^[36]

图4 基于电阻/阻抗调控的摩擦电传感器气湿敏感机理

气敏机理涉及摩擦起电、静电感应、气体吸附、界面反应、电荷转移、介电常数变化以及基尔霍夫定律等理论. 鉴于TENG复杂的等效电学模型,还可能存在着其他未被发现的敏感机理. 此外还存在多种气敏机理耦合的情况,各类机理在不同场合的适用性、耦合机理中各机理所占的比重等仍不确定,因此相关研究尚处于初步阶段.

3 一体化摩擦电气湿传感器研究进展

3.1 一体化摩擦电气体传感器

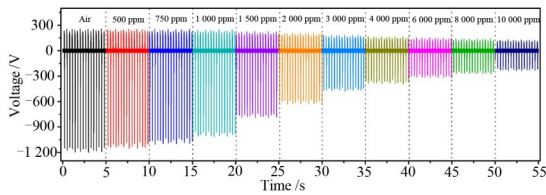
尽管从一开始就有研究表明外界水汽与乙醇的浓度将影响无封装TENG的输出性能^[24],但直到2015年科学家将上述现象应用在气体检测领域^[37],此后一体化摩擦电传感器才开始不断被报道. 下面从检测对象出发,主要从常见的 NH_3 、乙醇与其他有机挥发性气体(Volatile Organic Compound, VOC)检测来论述一体化摩擦电气体传感器领域的研究进展.

3.1.1 一体化摩擦电 NH_3 传感器

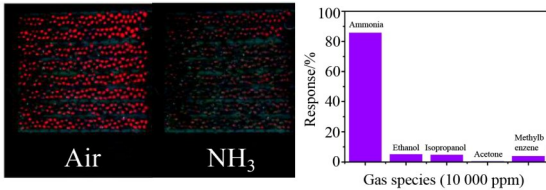
NH_3 是一种无色、有毒、有刺激性气味的气体,常见于工农业生产领域^[38,39]. 人若长期暴露在大于25 ppm (Part Per Million, 百万分之一)浓度 NH_3 环境下,呼吸系统、皮肤、眼结膜等会产生损伤. 此外, NH_3 是人体的代谢废物之一,如果呼出气、尿液、汗液、血液中 NH_3 含量过高,则往往与肾脏或消化系统疾病有关^[40]. 以呼出 NH_3 为例,正常人的呼出浓度普遍为0.425~1.8 ppm,远低于肾病患者呼出气体浓度(0.82~14.7 ppm). NH_3 具有较强的还原性、典型阈值浓度一般高于其他气体以及具有大量传统电阻型传感器的研究基础,因此在摩擦电气体检测领域格外受到研究者的关注.

中国科学院兰州化学物理研究所王道爱课题组于2018年报道了一种一体化摩擦电 NH_3 传感器,采用PANI同时作为正摩擦薄膜与电极层,聚偏氟乙烯(PolyVinylidene Fluoride, PVDF)作为负摩擦薄膜^[20]. 由于 NH_3 可以特异性的夺取导电聚苯胺中的质子,因此PANI的电阻变大,传感器的输出电压减小. 测试结果表明传感器可以实现500~10 000 ppm NH_3 的检测,对10 000 ppm气体的响应可达80.96%,且具有良好的选择性,并能通过观察发光二极管(Light Emitting Diode, LED)阵列灯亮的盏数来判断环境中的 NH_3 浓度(图5(a)~(c)). 然而该传感器需要进一步降低检测下限.

为进一步提升传感器对低浓度 NH_3 的检测能力,本课题组利用气喷工艺将水热合成的铈掺杂氧化锌(Ce-ZnO)纳米棒敏感材料制备成正摩擦薄膜,并将其与聚二甲基硅氧烷(PolyDiMethylSiloxane, PDMS)摩擦薄膜组装得到气体传感器(图6(a))^[41]. 高湿环境下 NH_3 可以与两性氧化物ZnO发生络合反应生成



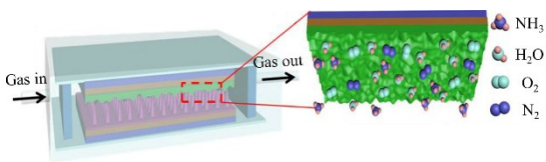
(a) 传感器的气敏性能



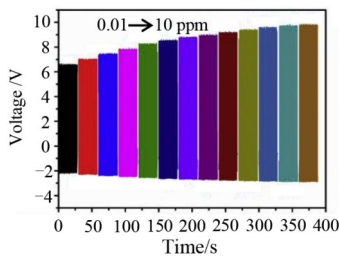
(b) 传感器气敏性能可视化展示 (c) 传感器的选择性

图5 PANI/PVDF基摩擦电NH₃传感器^[20]

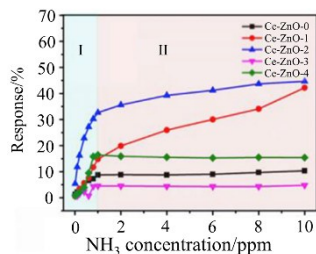
具有正电性的Zn(NH₃)₄²⁺离子,从而增大正摩擦薄膜表面的正电荷密度,进而提升传感器输出电压.测试结果表明优选后的传感器可以在97.5%相对湿度(Relative Humidity, RH)的高湿环境下检测到低至0.01 ppm的NH₃(图6(b)),且对1 ppm的NH₃响应高达32.66%(图6(c)).



(a) 传感器的器件结构



(b) NH₃浓度-输出电压关系



(c) 不同Ce掺杂ZnO气敏材料的响应对比

图6 Ce-ZnO/PDMS基摩擦电NH₃传感器^[41]

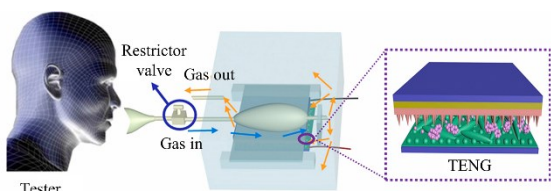
在传感器应用方面,本课题组设计了一种呼吸自供能NH₃传感器,该工作基于周期性呼吸产生的气囊涨缩,从而压迫气囊下侧的摩擦薄膜与气敏薄膜接触分离的发电原理(图7(a)),实现了不同呼吸行为的实时监测(图7(b))^[42].同时呼吸气从气囊吹出后直接进入测试腔内部与PANI基气敏薄膜发生反应,实现了0.1~25 ppm NH₃的有效检测,对25 ppm NH₃的响应可达40%,并通过对比输出电信号幅值大小初步实现了测试者洁净口腔、未刷牙、口腔溃疡的口腔环境区分(图7(c)),有望实现自供能传感器在人体健康监测领域的应用.广西大学聂双喜团队设计了一种导电木头材料^[32],通过将木头内部的木质素/半纤维素除去并将其浸泡在导电碳管溶液中,在保留了木头内部疏松多孔的特性的同时赋予了其导电能力.将其同时作为正摩擦材料与气敏材料,可以实现50~500 ppm NH₃的有效检测,且具有良好的选择性.最后将传感器与无线发送端、接收端与显示界面相结合,实现了食物变质信息的无线传输,有望在冷链传输中对食物新鲜程度的实时监控场合中得以应用(图7(d)~(f)).

3.1.2 一体化摩擦电乙醇传感器

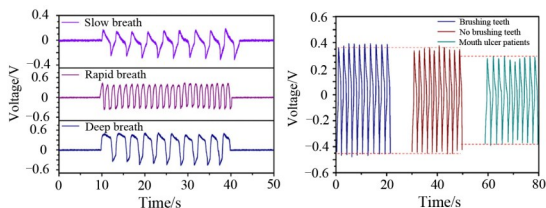
乙醇是一种容易挥发的、具有芳香性气味的易燃VOC,在工业生产中常常作为重要的原料与溶剂^[43].一般而言,乙醇在空气中的爆炸下限约为33 000 ppm^[44],因此需要对其进行实时监测.此外,当人大量饮酒后,由于乙醇无法及时代谢将会伴随呼吸气与汗/尿液及时排出,因此乙醇传感器在酒驾检测领域应用广泛^[26].尽管乙醇的化学活性较弱,但由于饮酒者呼出乙醇浓度(可以达到百ppm量级)显著高于未饮酒者的ppb量级(Part Per Billion,十亿分之一),因此仍可以产生明显的区分信号.近年来研究者们针对乙醇检测开展了一系列研究工作.

2014年王中林课题组构建了一种可以收集水滴运动动能的摩擦纳米发电机(图8(a)),并首次基于电荷耗散机理实现了水滴中不同乙醇比例的检测^[45].测试结果表明,传感器的检测范围为1%~20%(v/v).此外,将传感器与整流器、LED阵列相连,并通过观察LED灯的亮灭实现了乙醇浓度可视化检测(图8(b)).然而传感器的响应较小且检测下限过高,需要进一步提升器件气敏性能.

为进一步提升电荷耗散的能力,需要对敏感薄膜的形貌进行修饰,从而改善其对乙醇蒸汽的吸附.兰州大学秦勇团队通过反应离子刻蚀法在光洁的聚酰亚胺(Polyimide, PI)基底表面刻蚀得到纳米线阵列(图8(c)),并与多孔聚酰胺(PolyAmide, PA)膜组合得到摩擦电乙醇传感器^[46].测试结果表明,传感器针对500~10 000 ppm的乙醇具有良好的线性响应(图8(d)),

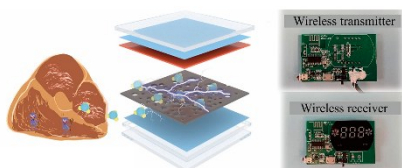


(a) 基于气囊胀缩效应的呼吸自供能传感器结构^[42]

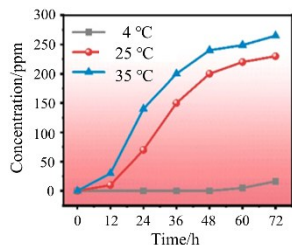


(b) 不同呼吸行为检测^[42]

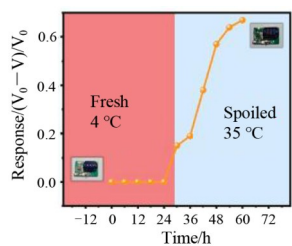
(c) 呼出 NH₃ 检测^[42]



(d) 传感器在肉类变质应用示意图及无线发射、接收端装置^[32]



(e) 猪肉变质产生 NH₃ 浓度与温度时间关系^[32]

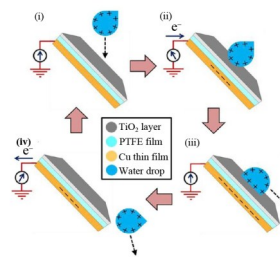


(f) 传感器对猪肉变质检测能力^[32]

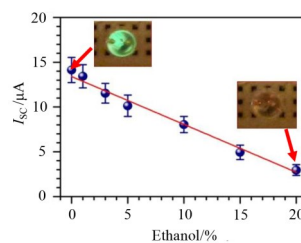
图7 摩擦电 NH₃ 传感器的应用

对 500 ppm 的乙醇响应为 8.1%。此外,由于摩擦薄膜为惰性绝缘体材料,因此紫外光对传感器的影响可以忽略,拓宽了传感器的应用场合。

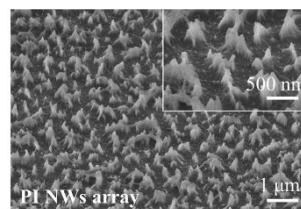
在传感器应用方面,东北大学薛新宇团队设计了一种可穿戴的敏感织物,该织物由多壁碳纳米管(Multi-Wall Carbon NanoTube, MWCNT)和 PANI 改性的 Ecoflex 导电纤维组成,纤维表面用漆包线缠绕(图9(a))^[47]。在施加拉伸或弯曲变形时,可以通过导电纤维和漆包



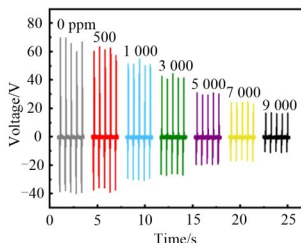
(a) 用于收集水滴动能的摩擦电传感器^[45]



(b) 传感器乙醇敏感性能与可视化展示^[45]



(c) PI 纳米纤维阵列表面 SEM 形貌图^[46]



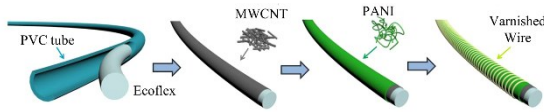
(d) 乙醇浓度与传感器输出电压的关系^[46]

图8 摩擦电乙醇传感器结构与性能

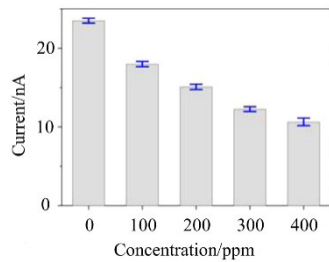
线之间的摩擦起电与静电感应产生电信号。附着在人体上的敏感织物可用于监测身体运动,包括手指弯曲和身体拉伸。此外,传感器可对 100~400 ppm 的乙醇气体具有良好的响应(图9(b)),对 400 ppm 乙醇蒸汽的响应高达 54.73%,且具有良好的重复性(图9(c))。最后研究了拉伸频率与幅值对气敏性能的影响,发现气敏响应大小没有明显变化,表明该传感器在气敏检测的应用过程中可以排除人体运动造成的影响,有利于在可穿戴检测场合的应用。

为进一步利用呼吸气流动能,东北大学/电子科技大学薛新宇、张岩团队设计了一种三明治结构的摩擦电乙醇传感器^[26]。该传感器通过呼出气流驱动中间

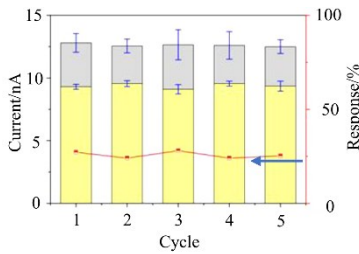
聚四氟乙烯 (PolyTetraFluoroEthylene, PTFE) 薄膜上下摆动并与两侧 PANI 薄膜发生周期性接触-分离得到输出信号,同时乙醇分子的羟基与表面 PANI 链的氮原子之间的相互作用导致大分子构象重排的阻碍,从而阻碍电子离域和电荷通过聚合物链的传输,最终导致 PANI 导电性降低,输出电信号幅值下降. 测试结果表明传感器对 30~210 ppm 的乙醇具有良好的线性响应. 团队还基于上述测试结果开展了呼出乙醇检测实验. 结合传感器与 LED 灯阵列,通过观察点亮 LED 灯泡数目的变化来实现不同国家酒驾标准的呼出乙醇浓度检测,如图 9(d) 所示.



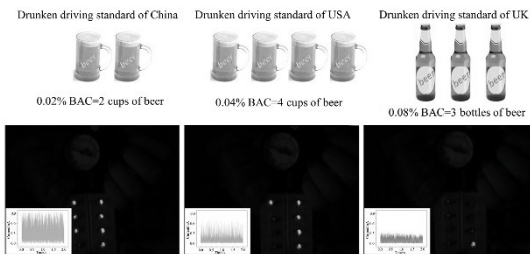
(a) 敏感织物的结构剖析图^[47]



(b) 敏感织物的输出电流与乙醇浓度的关系^[47]



(c) 敏感织物对乙醇的重复性响应^[47]



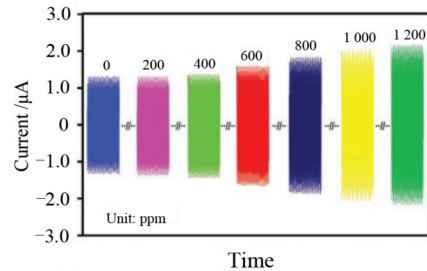
(d) 三明治结构传感器对不同国家酒驾标准呼出乙醇检测的 LED 阵列可视化展示^[26]

图 9 摩擦电乙醇传感器的应用

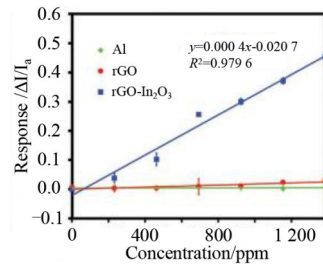
3.1.3 其他一体化摩擦电 VOC 气体传感器

VOC 气体大部分有毒且极易挥发,大量吸入会导

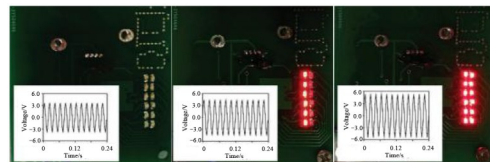
致人体出现恶心、呕吐,甚至是对呼吸系统、肝脏等造成不可逆的损伤^[48];此外人体呼出气中存在大量的 VOC 标志物,其含量的变化可能与人体某些疾病有关^[33,40],因此对 VOC 气体的检测十分重要. 然而大部分 VOC 气体在室温环境下活性较差且具有相似的物化特性,因此 VOC 气体传感器的响应和选择性有待提升. 如中国科学院大连化学物理研究所冯亮团队采用微波辅助水热法制备了一种氧化铜负载还原氧化石墨烯 (rGO-In₂O₃) 复合敏感材料用于正摩擦薄膜与苯胺气敏薄膜的制备^[49],测试结果表明传感器可针对 200~1 200 ppm 的苯胺蒸汽进行探测,且可通过 LED 阵列可视化展示环境中苯胺蒸汽浓度(图 10(a)~图 10(c)). 但传感器对苯胺蒸汽的灵敏度仅为 0.04 %/ppm,需要进一步提升气敏性能.



(a) 传感器对苯胺的气敏性能^[47]



(b) 苯胺浓度-响应线性拟合结果^[47]



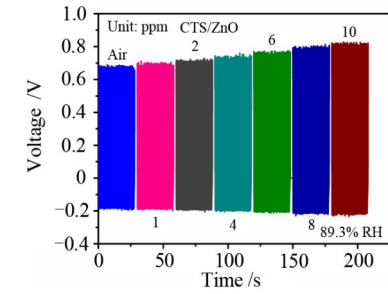
(c) 低、中、高浓度苯胺的 LED 阵列可视化展示^[47]

图 10 rGO-In₂O₃/PVDF 基摩擦电苯胺传感器

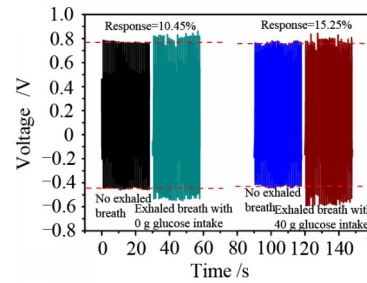
为改善传感器的灵敏度与选择性,利用敏感材料自身官能团特异吸附气体分子是一种可行的方案. 如本课题组、苏元捷及陈俊课题组利用壳聚糖 (ChiToSan, CTS)^[22,50]、聚乙烯亚胺 (PolyEthyleneImine, PEI)^[35] 自身富含的氨基可以与丙酮分子的羰基发生亲核加成反应的原理,设计了一系列的摩擦电丙酮传感器. 以 CTS/ZnO 分层敏感薄膜传感器为例^[22],测试结果表明传感

器可以实现低至 1 ppm 的丙酮检测(图 11(a)),且传感器的选择性得以提升,最小选择比为 3 左右,并可区分正常人与模拟糖尿病患者的呼出气(图 11(b)). 中国石油大学张冬至课题组同样利用亲核加成反应的吸附机理,设计了一种基于氨基官能团修饰的 MWCNT (MWCNT-NH₂)复合 MXene 敏感材料用于甲醛检测^[51]. 测试结果表明传感器对 0.01~5 ppm 的甲醛具有线性响应

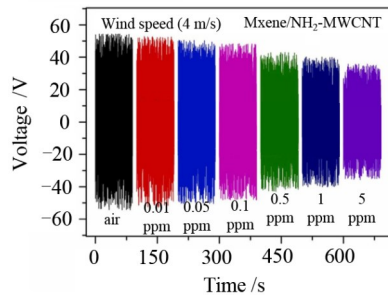
(图 11(c)),灵敏度可达 24.13 %/ppm,且具有至少 3.5 倍的选择比. 最后针对呼出甲醛浓度进行检测,发现传感器可以区分未吸烟、刚吸烟时、吸烟后测试者的呼出气信号,如图 11(d)所示. 尽管利用官能团吸附机理可以有效改善部分气体的响应,但分子结构类似的气体会导致传感器出现交叉干扰的问题,通过设计阵列与模式算法识别是解决上述问题的一种有效方案.



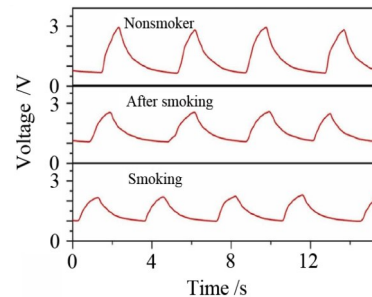
(a) 传感器对丙酮的气敏性能^[22]



(b) 正常人与模拟糖尿病患者呼出气检测性能对比^[22]



(c) 传感器对甲醛的气敏性能^[51]

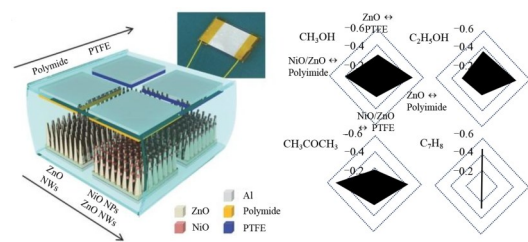


(d) 未吸烟、吸烟时与吸烟后呼出气检测性能对比^[51]

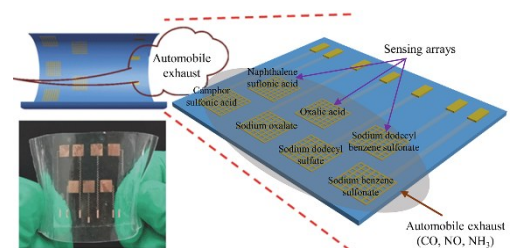
图 11 摩擦电丙酮与甲醛传感器性能与呼吸检测

在阵列检测方面,韩国蔚山科学技术研究院 Jeong Min Baik 团队设计了一种 2×2 摩擦纳米发电机阵列,首次开展了对甲醇、乙醇、丙酮与甲苯蒸汽的检测(图 12(a))^[37]. 检测结果表明传感器可以检测到低至 1 000 ppm 的蒸汽浓度,但传感器对甲醇和乙醇的区分能力还需进一步提升,此外传感器的检测下限有待进一步降低. 薛新宇团队设计了一种基于不同掺杂剂掺杂的 PPy 敏感电极阵列,并与 PDMS 摩擦薄膜相结合得到用于汽车尾气检测的接触分离器件(图 12(b))^[29]. 测试结果表明 PPy 掺杂剂的不同对 NH₃、一氧化碳(CO)与一氧化氮(NO)呈现出选择性响应,利用上述阵列对汽车尾气进行检测,通过观察输出电压变化趋势可以区分出不同汽车或汽油型号的尾气检测.

除 NH₃、VOC 气体外,一体化摩擦电传感器还在 H₂S^[36]、二氧化碳(CO₂)^[52]、氢气(H₂)^[30,53,54]、乙炔^[31,55]等领域开展了检测. 表 2 展示了近年来一体化摩擦电气体传感器的相关工作^[20-22,24,26,28-32,35,37,41,42,45-47,49-61]. 一体化摩擦电传感器尚处于研究初期阶段,在测试气体与敏感材料、敏感性能、气敏机理等方面仍需进一步探索.



(a) 一体化摩擦电 VOC 检测阵列与测试结果^[37]



(b) 一体化摩擦电汽车尾气检测阵列示意图^[29]

图 12 摩擦电 VOC 传感器阵列与应用

表 2 一体化摩擦电气体传感器(阵列)的性能对比

敏感材料/对立摩擦材料	测试气体	检测范围	响应值	响应时间	参考文献
PANI/PVDF	NH ₃	500~10 000 ppm	80.96% (10 000 ppm) ^e	≈40 s ⁱ	文献[20]
PANI/PTFE	NH ₃	100~1 000 ppm	40.95% (1 000 ppm) ^e	—	文献[21]
导电木头/FEP ^a	NH ₃	50~500 ppm	87.87% (500 ppm) ^e	≈9 s ^j	文献[32]
Ce-ZnO/PDMS	NH ₃	0.01~10 ppm	44.68% (10 ppm) ^e	≈155 s ⁱ	文献[41]
Ce-ZnO-PANI/PDMS	NH ₃	0.1~25 ppm	≈20% (5 ppm) ^e	≈109 s ⁱ	文献[42]
PFOTES-Ti ₃ C ₂ T _x -CNF ^b /尼龙	NH ₃	10~120 ppm	71.42% (120 ppm) ^e	≈12 s ^j	文献[56]
Al/PTFE(无敏感材料)	乙醇	20~100 wt%	≈33% (20 wt%) ^e	—	文献[24]
PANI/PTFE	乙醇	30~210 ppm	66.8% (210 ppm) ^f	<20 s ^j	文献[26]
SiO ₂ /PTFE(无敏感材料)	乙醇	1~20 wt%	≈78.57% (20 wt%) ^e	—	文献[45]
PI 纳米线阵列/PA	乙醇	500~9 000 ppm	≈8.1% (500 ppm) ^e	—	文献[46]
盐酸掺杂 PANI-MWCNT/漆包线	乙醇	100~400 ppm	≈54.73% (400 ppm) ^f	—	文献[47]
rGO-In ₂ O ₃ /Al	苯胺	200~1 200 ppm	≈30% (800 ppm) ^f	≈200 s ⁱ	文献[49]
CTS-ZnO/PDMS	丙酮	1~10 ppm	≈19.02% (10 ppm) ^e	≈1 883 s ⁱ	文献[22]
PEI-SnO ₂ /乳胶气球	丙酮	2~10 ppm	≈16.26% (10 ppm) ^e	≈346 s ⁱ	文献[35]
CTS-rGO/	丙酮	2~10 ppm	27.89% (10 ppm) ^e	—	文献[50]
Ti ₃ C ₂ T _x -MWCNT-NH ₂ /尼龙	甲醛	0.01~5 ppm	≈36% (5 ppm) ^e	≈57 s ⁱ	文献[51]
bpy-PMA ^c /PDMS	甲醛	0.5~60 ppm	≈38.5% (60 ppm) ^e	≈4.65 s ⁱ	文献[57]
Pd-ZnO/PDMS	H ₂	10~10 000 ppm	≈373% (10 000 ppm) ^g	≈96 s ⁱ	文献[30]
Pd/PET ^d	H ₂	0.25%~4%	≈70% (1%) ^e	—	文献[53]
Pd/微晶纤维素	H ₂	0.001%~2%	≈83% (1%) ^e	≈85 s ⁱ	文献[54]
Al-Ag-碳纳米纤维/PDMS	乙炔	10~1 000 ppm	≈83% (1 000 ppm) ^e	≈88 s ⁱ	文献[31]
Ag-ZnO/PDMS	乙炔	30~1 000 ppm	≈39.2%(100 ppm,室内) ^e	—	文献[55]
PEI/FEP	CO ₂	—	11.73% (100%) ^e	—	文献[52]
导电玻璃-PEI/PDMS	CO ₂	420~30 000 ppm	0.2 nC (13 000 ppm,电荷变量)	—	文献[58]
PVDF-TiO ₂ /醋酸纤维素	苯	4 814~20 861 ppm	80% (20 861 ppm) ^e	—	文献[59]
PPy/PDMS	甲醇	100~1 200 ppm	63.27% (1 200 ppm) ^f	≈15 s ⁱ	文献[28]
ZIF-8@ZnO/PVDF	甲醇	100~1 000 ppm	≈15% (100 ppm) ^e	≈5.9 s ⁱ	文献[60]
PPy/PDMS(4个单元)	NH ₃ , CO, NO	50~250 ppm	3.12%, 34.23%, 86.91%(50 ppm,以樟脑磺酸掺杂 PPy 为例) ^j	—	文献[29]
ZnO/PI, ZnO-NiO/PI, ZnO/PTFE, ZnO-NiO/PTFE	甲醇, 乙醇, 丙酮, 甲苯	0.1~10 wt%(乙醇)	—	≈240 s(ZnO/PTFE 对乙醇) ⁱ	文献[37]
PPy/PDMS(8个单元)	甲醇, 乙醇, 丙酮, 氯仿, 甲苯	100~600 ppm(丙酮)	5.27%, 5.19%, 29.04%, 6.55%, 10.95%(600 ppm,以 CuPcTs 掺杂 PPy 为例) ^j	~200 s(CuPcTs 掺杂 PPy 对丙酮) ^{h,j}	文献[61]

注:^aFEP:氟化乙烯丙烯共聚物。^bPFOTES-Ti₃C₂T_x-CNF:三乙氧基-1H,1H,2H,2H-三氟正辛基硅烷-碳化钛-纤维素纳米纤维。^cbpy-PMA:4,4'-联吡啶-功能化磷钼酸。^dPET:聚对苯二甲酸乙二醇酯。^e响应值定义为 $\Delta V/V_0 \times 100\%$ 。^f响应值定义为 $\Delta I/I_0 \times 100\%$ 。^g响应值定义为 $\Delta V/V_g \times 100\%$ ($\Delta V, \Delta I, V_0, I_0, V_g$ 分别为电压变化量、电流变化量、基线电压、基线电流以及特定浓度下的响应电压)。^h响应时间定义为达到变化量的90%时所需时间。ⁱ响应时间定义为达到新平衡时所需时间。^j酞菁铜(II)四磺酸四钠盐。

3.2 一体化摩擦电湿度传感器

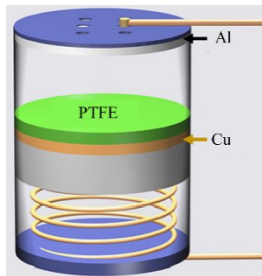
湿度作为一种重要的环境参数,在工农业、食品加工、航空航天等领域中均需开展相关检测^[62-64]。目前传统的电阻/电容型湿度传感器发展较为成熟,然而绝大部分湿度传感器需要外界能源的驱动,限制了其在无源条件下的应用。鉴于上述背景,结合传感器的集成化

需求,研究人员开展了一体化摩擦电湿度传感器的研究,下面对其研究现状进行概述。

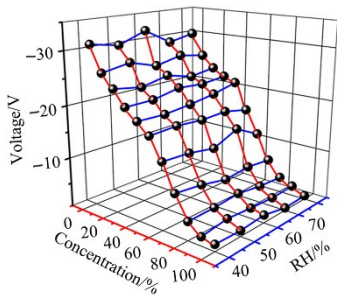
3.2.1 一体化摩擦电湿度传感器的性能研究

2013年,王中林课题组在研究摩擦纳米发电机输出性能时,发现环境湿度对输出电压的大小影响很大(图13(a)和(b))^[24],由此开启了一体化摩擦电湿度传

传感器的研究. 水汽的存在可以附着在摩擦薄膜表面, 从而耗散/屏蔽摩擦电荷, 导致输出电压降低. 上述现象在随后几年被其他学者所证实, 成了摩擦电湿度传感器的主流敏感机理, 然而传感器性能较差与应用需求制约了其进一步的发展.



(a) TENG 器件结构^[24]

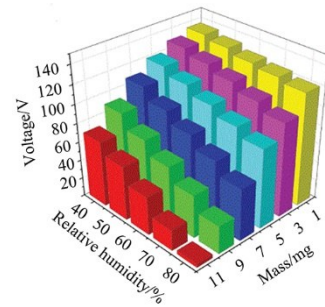


(b) TENG 在不同湿度与乙醇浓度下的输出电压变化^[24]

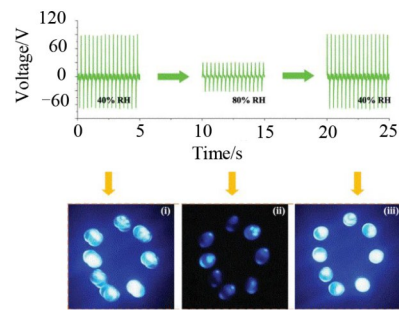
图 13 环境因素对 TENG 输出性能的影响

为提升湿度传感器的性能, 采用吸湿材料是一种简单可行的方案. 如浙江大学夏克泉团队利用气喷法将吸湿材料氯化锂 (LiCl) 喷涂在纸张表面作为敏感薄膜^[65], 研究了 LiCl 附着量在不同湿度环境下的输出电压, 结果表明优化后的器件在 40%~80% RH 范围内具有明显的相对电压变化(图 14(a)), 并通过 LED 阵列的亮暗实时反馈环境湿度, 如图 14(b)所示; 本团队设计了一种旋片式摩擦纳米发电机(图 14(c)), 其中 CTS 与氨基化氧化石墨烯(GO-NH₂)复合材料作为敏感薄膜与正摩擦薄膜^[23], 两种敏感材料富含亲水官能团且 GO-NH₂ 的褶皱形貌显著增大了 CTS 的比表面积, 赋予了敏感薄膜良好的吸湿与脱湿能力. 测试结果如图 14(d)所示, 结果表明传感器具有较广的湿敏范围(18.7%~91.5% RH)、较大的响应(对 91.5% RH 的响应为 94.45%)以及较低的湿滞(6.2% RH); 王中林团队通过多层氧化石墨烯(GO)、聚乙烯基倍半硅氧烷(PolyVinylSilsesQuioxane, PVSQ)和聚乙烯醇(PolyVinyl Alcohol, PVA)的溶液浇筑工艺制备了一种具有良好稳定性和湿度敏感性的 GO-PVSQ/PVA 复合薄膜, 将其与植物叶片组合得到一种活体摩擦纳米发电机^[66], 实现了 20%~70% RH 范围内的高灵敏响应, 灵敏度约为 -3 V/% RH, 并对叶片表

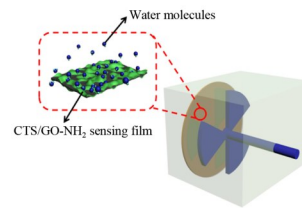
面的湿度进行实时监测(图 14(e)), 有望在未来智慧农业中优化农作物灌溉的场合得以应用.



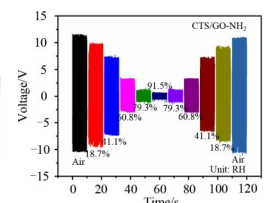
(a) 不同 LiCl 喷涂质量的传感器输出电压与环境湿度的关系^[65]



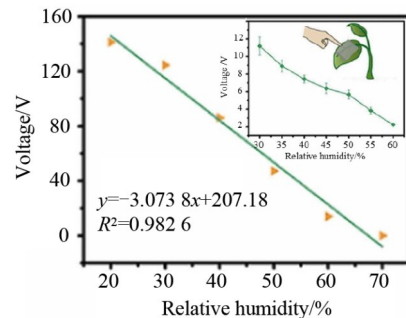
(b) LED 阵列湿度监测的可视化展示^[65]



(c) 传感器模型图^[23]



(d) 传感器的湿敏性能^[23]



(e) 传感器的湿敏性能. 插图为自驱动叶片湿度监测结果^[66]

图 14 电信号下降型摩擦电湿度传感器性能

尽管一体化摩擦电湿度传感器的性能较好, 然而湿度的存在往往不利于传感器的输出, 这对这类传感器在自供电检测应用中极为不利. 近年来, 研究者们发现摩擦起电的来源除了摩擦薄膜之间的电子转移, 还有离子转移^[67-69]. 如果利用离子转移赋予摩擦薄膜吸

附水中离子(H^+ 与 OH^-)的能力以间接增大介电层的摩擦电荷密度,传感器在高湿环境下的输出电信号将得到提升(图 15(a)). 如台湾清华大学林宗宏课题组基于上述原理设计了一种基于明胶-甘油敏感薄膜的摩擦纳米发电机^[27],并发现由于电子转移与离子转移之间存在竞争关系,导致传感器输出电压随湿度变化先增大后减小,在 60% RH 下达到峰值电压(图 15(b)). 除此之外,研究者们还发现当水汽与正摩擦薄膜之间存在氢键相互作用时,水分子成膜并固定在薄膜表面^[23,70]. 水分子自身更容易失去电子,具有正电性,间接增大了正摩擦薄膜处的正电荷密度,从而提升发电机的输出电信号^[71]. 王道爱课题组于 2021 年设计了一种 PVA 为正摩

擦薄膜、聚丙烯(PolyPropylene, PP)为负摩擦薄膜的摩擦电自供能口罩^[72],并通过替换是否具有亲水官能团的正摩擦薄膜材料验证了上述机理的普适性. 测试结果表明该口罩可检测 15%~95% RH 范围内的湿度,并可长期保持生成的摩擦电荷,有望在可穿戴检测领域中得以应用(图 15(c));2022 年设计了一种氰乙基纤维素(CE-cellulose)为正摩擦薄膜、PTFE 为负摩擦薄膜的摩擦电传感器^[73],可检测到 15%~95% RH 范围内的湿度,并在 95% RH 的高湿环境下将摩擦电荷密度提升到了 $533 \mu C/m^2$. 除了在高湿环境下良好的驱动 LED 阵列工作外(图 15(d)),由于该传感器在高湿环境输出不衰减,因此还可将其集成在鞋垫上进行步态运动监测应用.

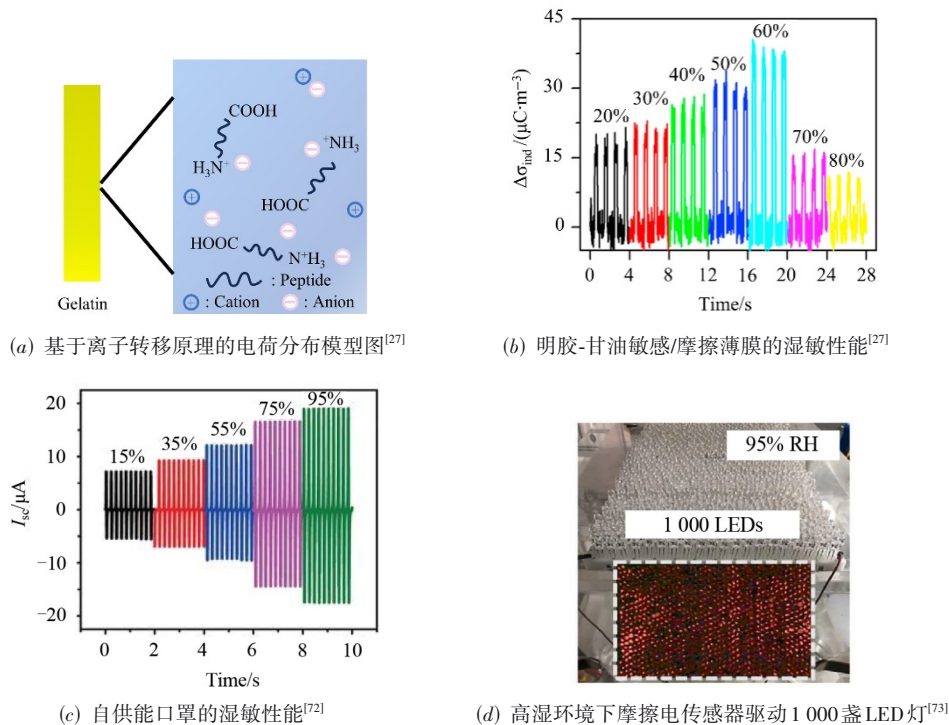


图 15 信号上升型摩擦电湿度传感器性能

表 3 展示了近年来一体化摩擦电湿度传感器的相关工作^[23,24,27,65,66,71-84]. 尽管传感器对湿度检测的性能显著优于气体检测,但针对宽检测范围、快响应、低湿滞的湿度传感器研究仍具有应用价值. 此外,针对湿度诱导输出电信号提升的敏感机理还需进一步探索与验证.

3.2.2 一体化摩擦电湿度传感器的应用研究

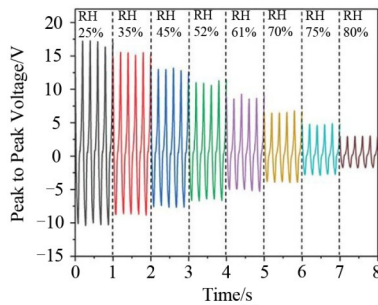
在应用方面,湿度传感器由于响应较大且具有较快的响应恢复能力,因此在非接触开关、皮肤湿度检测以及尿不湿等领域具有一定的应用. 如韩国光云大学 Jae Y. Park 课题组设计了一种硅氧烯/Ecoflex 敏感薄膜、二硫化钼(MoS_2)与石墨烯作为背电极的非接触式

传感器^[80],结果表明传感器除了对手掌的靠近远离具有感应外,手掌表面湿度变化(25%~80% RH)也会影响传感器输出电压(图 16(a)). 他们基于此原理设计了一种非接触式洗手液供给装置(图 16(b)),实现了对潮湿手掌供给洗手液的应用(图 16(c)). 阿姆利泽纳那克大学 Aman Mahajan 课题组通过静电纺丝工艺制备了 PVA/MXene 与醋酸纤维素纳米纤维薄膜,分别作为对立的摩擦薄膜并将其安装在拇指和食指上得到传感器^[81],通过涂抹化妆水来控制手指上的水分,实现了手指敲击驱动检测手指湿度的应用,如图 16(d)所示. 薛新宇团队通过电化学聚合法在 Cu 网电极上聚合 PANI,得到正摩擦湿敏薄膜,将其与对侧的 PTFE 薄膜组装得到一种

表 3 一体化摩擦电湿度传感器的性能对比

敏感材料/对立摩擦材料	检测范围	响应值	响应时间	电信号变化与湿度关系	参考文献
CTS-GO-NH ₂ /PTFE	18.7%~91.5% RH	94.45%/91.5% RH ^c	≈254 s ^e	湿度增加,输出下降	文献[23]
Al/PTFE(无敏感材料)	40%~80% RH	—	—	湿度增加,输出下降	文献[24]
LiCl-纸张/硅油	40%~80% RH	75.20%/80% RH ^c	—	湿度增加,输出下降	文献[65]
GO-PVSQ-PVA ^a /植物叶片	20%~70% RH	99.96%/70% RH ^c	≈6.4 s ^h	湿度增加,输出下降	文献[66]
导电玻璃/PTFE(无敏感材料)	20%~100% RH	87.80%/100% RH(流量为 25 升每分钟) ^d	—	湿度增加,输出下降	文献[74]
Al/PTFE(无敏感材料)	20%~100% RH	59.69%/100% RH(流量为 7.2 升每分钟) ^f	—	湿度增加,输出下降	文献[75]
维生素 B1 粉末/PTFE	40%~90% RH	71.70%/90% RH ^c	—	湿度增加,输出下降	文献[76]
NaCl-Al/PTFE	30%~70% RH	≈25%/60% RH ^c	—	湿度增加,输出下降	文献[77]
GO+GONR 纸张 ^g /PI	20%~99% RH	124%/99% RH ^c	≈0.3 s ^h	湿度增加,输出下降	文献[78]
PANI-Cu/PTFE	50%~90% RH	62.80%/90% RH ^c	—	湿度增加,输出下降	文献[79]
硅氧烯-Ecoflex/手掌	25%~80% RH	83.87%/80% RH ^c	—	湿度增加,输出下降	文献[80]
MXene-PVA/醋酸纤维素	44%~80% RH	215%/80% RH ^c	—	湿度增加,输出下降	文献[81]
Al/PDMS(无敏感材料)	10%~90% RH	14.52%/90% RH ^c	≈2.2 s ^e	湿度增加,输出下降	文献[82]
PDMS-GO/Ag	30%~90% RH	≈81.25%/90% RH ^c	—	湿度增加,输出下降	文献[83]
明胶-甘油/PTFE	20%~80% RH	128.57%/60% RH ^f	—	湿度增加,输出先上升后下降(60% RH 最高)	文献[27]
淀粉/PTFE	15%~95% RH	250%/95% RH ^c	—	湿度增加,输出上升	文献[71]
PVA/PTFE	15%~95% RH	217%/95% RH ^c	—	湿度增加,输出上升	文献[72]
CE-cellulose/PTFE	15%~95% RH	388%/95% RH ^c	—	湿度增加,输出上升	文献[73]
PVA-LiCl-MXene/PTFE	30%~95% RH	46.68%/95% RH ^c	—	湿度增加,输出上升	文献[84]

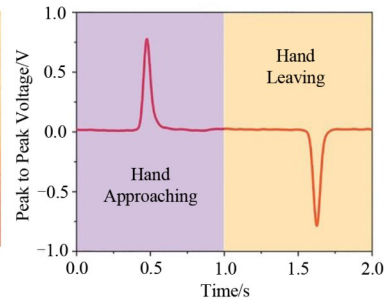
注:^aPVSQ: 聚乙烯基倍半硅氧烷。^bGONR: 氧化石墨烯纳米带。^c响应值定义为 $|\Delta V|/V_0 \times 100\%$ 。^d响应值定义为 $|\Delta I|/I_0 \times 100\%$ 。^e响应值定义为 $|\Delta V|/V_0 \times 100\%$ 。^f响应值定义为 $|\Delta \sigma|/\sigma_0 \times 100\%$ ($\Delta V, \Delta I, V_0, I_0, \Delta \sigma, \sigma_0$ 分别为电压变化量、电流变化量、基线电压、基线电流、特定湿度下的响应电压、摩擦电荷密度变化量以及基线摩擦电荷密度)。^g响应时间定义为达到变化量的 90% 时所需时间。^h响应时间定义为达到新平衡时所需时间。



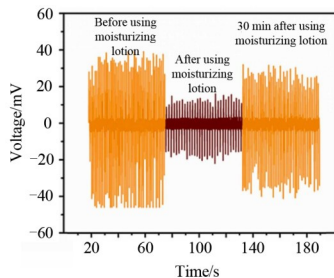
(a) 非接触型湿度传感器的湿敏性能^[80]



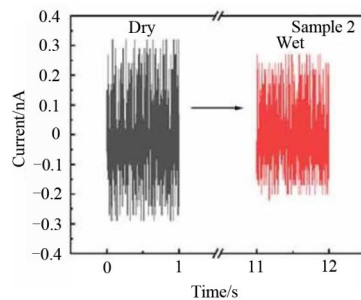
(b) 非接触洗手液供给装置^[80]



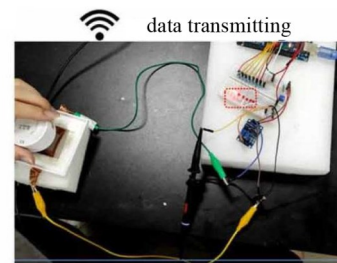
(c) 手掌运动监测信号^[80]



(d) 手指运动驱动传感器实现皮肤湿度变化的自驱动检测^[81]



(e) 婴儿尿不湿检测结果^[79]



(f) 湿度监测系统^[79]

图 16 摩擦电湿度传感器的应用

多孔的摩擦电湿度传感器^[79],该传感器在最佳音波驱动条件(325 Hz, 114 dB)下对 50%~90% RH 的湿度具有良好的区分能力,在此基础上实现了模拟婴儿尿不湿检测的应用,并通过无线传输装置实现了信号传输(图 16(e)和(f)).

综上所述,目前研究者在一体化摩擦电湿度传感器的应用方面开展了部分研究工作.然而仍然存在一些不足:

(1)一体化传感器的湿度响应恢复速度还需要进一步提升,尤其是针对呼吸等湿度快速切换的应用场景,可通过优选材料、减小测试腔体积等方式进行改善;

(2)由于 TENG 自身输出受外界作用力影响较大,传感器的输出实际是作用力与湿敏的耦合信号,在作用力变化规律不清楚时难以提取相关信息,可通过结构优化、后端算法补偿等方式进行改善;

(3)为在未来真正实现自供能检测,传感器的发电量需要进一步提升,一方面需要提升 TENG 自身的输出功率,另一方面针对湿度诱导传感器输出电信号提升的材料与机理需要进一步研究.

4 总结与展望

本文首先阐述了一体化摩擦电气湿传感器的研究背景与意义,接下来对研究者们目前提出的气湿敏机理模型进行了归纳总结,然后详细介绍了一体化摩擦电传感器在气湿敏检测的研究现状.尽管这类传感器在无源场合中具有广泛的应用前景,但目前仍处于初步探索的阶段,在检测气体种类、检测范围、检测下限、耦合气湿敏机理以及自供能应用领域等方面仍需进一步发展.具体来说:

(1)由于环境检测中针对有毒有害气体的浓度探测需达到 ppm 甚至 ppb 量级,因此需要提升传感器的检测灵敏度与选择性.可赋予敏感薄膜表面微纳结构或修饰特定的官能团,通过增大表面积或增强化学反应来提升气体的选择吸附.

(2)目前的主流研究仍采用步进电机等驱动传感器工作,这与自供能技术的初衷相违背.可在改善传感器气湿敏性能的基础上,通过结构优化设计出一系列针对不同应用场景下的环境机械能收集装置,从而实现真正意义上的自供能.

(3)设计针对气湿检测的后端信号处理与传输电路.在此基础上可进一步集成多个能量转化装置与收集模块,构建基于常规环境下可长期维持的自驱动检测系统.

(4)为实现对整个系统的高效供能,可通过电荷泵^[85]、离子注入^[86]、增大介电层介电常数^[87]等方式对

传感器以及能量转化装置的输出功率进行提升.

参考文献

- [1] 蒋亚东, 谢光忠. 敏感材料与传感器[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2008.
JIANG Y D, XIE G Z. Sensitive Materials and Sensors [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 李冬梅, 黄元庆, 张佳平, 等. 几种常见气体传感器的研究进展[J]. 传感器世界, 2006, 12(1): 6-11.
LI D M, HUANG Y Q, ZHANG J P, et al. The development of several normal gas sensors[J]. Sensor World, 2006, 12(1): 6-11. (in Chinese)
- [3] GOPI K K, SAIDIREDDY P, NAGARAJU P, et al. Nanostructured metal oxide semiconductor-based gas sensors: A comprehensive review[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 341: 113578.
- [4] JEONG S Y, KIM J S, LEE J H. Rational design of semiconductor-based chemiresistors and their libraries for next-generation artificial olfaction[J]. Advanced Materials, 2020, 32(51): e2002075.
- [5] BLUE R, UTTAMCHANDANI D. Chemicapacitors as a versatile platform for miniature gas and vapor sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(2): 022001.
- [6] FAUZI F, RIANJANU A, SANTOSO I, et al. Gas and humidity sensing with quartz crystal microbalance (QCM) coated with graphene-based materials—A mini review[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 330: 112837.
- [7] LI X, SUN W F, FU W, et al. Advances in sensing mechanisms and micro/nanostructured sensing layers for surface acoustic wave-based gas sensors[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11(17): 9216-9238.
- [8] LOPEZ-TORRES D, ELOSUA C, ARREGUI F J. Optical fiber sensors based on microstructured optical fibers to detect gases and volatile organic compounds—A review[J]. Sensors, 2020, 20(9): 2555.
- [9] LIANG J G, JIANG Y C, WU J K, et al. Multiplex-gas detection based on non-dispersive infrared technique: A review[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 356: 114318.
- [10] 刘方猛. 基于稳定氧化锆和复合氧化物敏感电极的全固态电化学气体传感器研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
LIU F M. Solid State Electrochemical Gas Sensors Based on Stabilized Zirconia and Composite Oxide Sensing Electrodes[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in

- Chinese)
- [11] ZHANG Y Y, GU T Y, LIU F M, et al. Room temperature mixed-potential solid-electrolyte NO₂ sensor for environmental monitoring[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 390: 133943.
- [12] 张弛, 付贤鹏, 王中林. 摩擦纳米发电机在自驱动微系统研究中的现状与展望[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(7): 89-101.
- ZHANG C, FU X P, WANG Z L. Review and prospect of triboelectric nanogenerators in self-powered microsystems [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(7): 89-101. (in Chinese)
- [13] FAN F, TIAN Z, WANG Z L. Flexible triboelectric generator[J]. *Nano Energy*, 2012, 1: 328-334.
- [14] WEN Z, CHEN J, YE H M, et al. Blow-driven triboelectric nanogenerator as an active alcohol breath analyzer [J]. *Nano Energy*, 2015, 16: 38-46.
- [15] WANG D Y, ZHANG D Z, YANG Y, et al. Multifunctional latex/polytetrafluoroethylene-based triboelectric nanogenerator for self-powered organ-like MXene/metal-organic framework-derived CuO nanohybrid ammonia sensor[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(2): 2911-2919.
- [16] JIANG J X, ZHANG Y, SHEN Q Q, et al. A self-powered hydrogen leakage sensor based on impedance adjustable windmill-like triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2021, 89: 106453.
- [17] FAN F R, TANG W, WANG Z L. Flexible nanogenerators for energy harvesting and self-powered electronics [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4283-4305.
- [18] WEN Z, SHEN Q Q, SUN X H. Nanogenerators for self-powered gas sensing[J]. *Nano-Micro Letters*, 2017, 9(4): 45.
- [19] 王中林, 林龙, 陈俊, 等. 摩擦纳米发电机[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- WANG Z L, LIN L, CHEN J, et al. *Triboelectric Nanogenerator*[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [20] CUI S W, ZHENG Y B, ZHANG T T, et al. Self-powered ammonia nanosensor based on the integration of the gas sensor and triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2018, 49: 31-39.
- [21] LIU S N, YUAN G T, ZHANG Y, et al. A self-powered gas sensor based on coupling triboelectric screening and impedance matching effects[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(12): 2100310.
- [22] LIU B H, WANG S, YUAN Z, et al. Novel chitosan/ZnO bilayer film with enhanced humidity-tolerant property: Endowing triboelectric nanogenerator with acetone analysis capability[J]. *Nano Energy*, 2020, 78: 105256.
- [23] LIU B H, XIE G Z, LI C Z, et al. A chitosan/amido-graphene oxide-based self-powered humidity sensor enabled by triboelectric effect[J]. *Rare Metals*, 2021, 40(8): 1995-2003.
- [24] ZHANG H L, YANG Y, SU Y J, et al. Triboelectric nanogenerator as self-powered active sensors for detecting liquid/gaseous water/ethanol[J]. *Nano Energy*, 2013, 2(5): 693-701.
- [25] ZHANG X S, HAN M D, WANG R X, et al. High-performance triboelectric nanogenerator with enhanced energy density based on single-step fluorocarbon plasma treatment[J]. *Nano Energy*, 2014, 4: 123-131.
- [26] XUE X Y, FU Y M, WANG Q, et al. Outputting olfactory bionic electric impulse by PANI/PTFE/PANI sandwich nanostructures and their application as flexible, smelling electronic skin[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(18): 3128-3138.
- [27] CHANG T H, PENG Y W, CHEN C H, et al. Protein-based contact electrification and its uses for mechanical energy harvesting and humidity detecting[J]. *Nano Energy*, 2016, 21: 238-246.
- [28] FU Y M, HE H X, LIU Y, et al. Self-powered, stretchable, fiber-based electronic-skin for actively detecting human motion and environmental atmosphere based on a triboelectrification/gas-sensing coupling effect[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(5): 1231-1239.
- [29] HE H X, ZHANG M Y, ZHAO T M, et al. A self-powered gas sensor based on PDMS/Ppy triboelectric-gas-sensing arrays for the real-time monitoring of automotive exhaust gas at room temperature[J]. *Science China Materials*, 2019, 62(10): 1433-1444.
- [30] UDDIN A S M I, CHUNG G S. A self-powered active hydrogen gas sensor with fast response at room temperature based on triboelectric effect[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 231: 601-608.
- [31] UDDIN A S M I, KUMAR P S, HASSAN K, et al. Enhanced sensing performance of bimetallic Al/Ag-CNF network and porous PDMS-based triboelectric acetylene gas sensors in a high humidity atmosphere[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 258: 857-869.
- [32] CAI C C, MO J L, LU Y X, et al. Integration of a porous wood-based triboelectric nanogenerator and gas sensor for real-time wireless food-quality assessment[J]. *Nano Energy*, 2021, 83: 105833.

- [33] SU Y J, CHEN G R, CHEN C X, et al. Self-powered respiration monitoring enabled by a triboelectric nanogenerator[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(35): e2101262.
- [34] SU Y J, WANG J J, WANG B, et al. Alveolus-inspired active membrane sensors for self-powered wearable chemical sensing and breath analysis[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(5): 6067-6075.
- [35] LIU B H, LIBANORI A, ZHOU Y H, et al. Simultaneous biomechanical and biochemical monitoring for self-powered breath analysis[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(5): 7301-7310.
- [36] LIU B H, JIANG Y D, XIE G Z, et al. Lever-inspired triboelectric respiration sensor for respiratory behavioral assessment and exhaled hydrogen sulfide detection[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 471: 144795.
- [37] KIM J H, CHUN J, KIM J W, et al. Self-powered, room-temperature electronic nose based on triboelectrification and heterogeneous catalytic reaction[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(45): 7049-7055.
- [38] DUAN X H, DUAN Z H, ZHANG Y J, et al. Enhanced NH_3 sensing performance of polyaniline via a facile morphology modification strategy[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 369: 132302.
- [39] WANG S, LIU B H, DUAN Z H, et al. PANI nanofibers-supported Nb₂C₂T_x nanosheets-enabled selective NH_3 detection driven by TENG at room temperature[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 327: 128923.
- [40] TAI H L, WANG S, DUAN Z H, et al. Evolution of breath analysis based on humidity and gas sensors: Potential and challenges[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 318: 128104.
- [41] WANG S, JIANG Y D, TAI H L, et al. An integrated flexible self-powered wearable respiration sensor[J]. *Nano Energy*, 2019, 63: 103829.
- [42] WANG S, TAI H L, LIU B H, et al. A facile respiration-driven triboelectric nanogenerator for multifunctional respiratory monitoring[J]. *Nano Energy*, 2019, 58: 312-321.
- [43] FU Q, LU K Z, LI N, et al. Advances in the development of MOS-based sensors for detection of ethanol: A review [J]. *Materials Research Bulletin*, 2023, 168: 112457.
- [44] ESCALANTE E S R, CORONADO C J R, DE CARVALHO JÚNIOR J A. A detailed experimental and numerical assessment of the QAV-1/anhydrous ethanol blends in their lower flammability limits[J]. *Fuel*, 2022, 311: 122531.
- [45] LIN Z H, CHENG G, WU W Z, et al. Dual-mode triboelectric nanogenerator for harvesting water energy and as a self-powered ethanol nanosensor[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(6): 6440-6448.
- [46] HAO M M, ZHANG R C, JIA X F, et al. A polymer based self-powered ethanol gas sensor to eliminate the interference of ultraviolet light[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 332: 113173.
- [47] ZHAO T M, LI J L, ZENG H, et al. Self-powered wearable sensing-textiles for real-time detecting environmental atmosphere and body motion based on surface-triboelectric coupling effect[J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(40): 405504.
- [48] 赵秋妮, 蒋亚东, 袁震, 等. MXene 复合气敏材料: 进展与未来挑战[J]. *科学通报*, 2022, 67(24): 2823-2834.
- ZHAO Q N, JIANG Y D, YUAN Z, et al. Progress and future challenges of MXene composites for gas sensing [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(24): 2823-2834. (in Chinese)
- [49] CHANG J Y, MENG H, LI C S, et al. A wearable toxic gas-monitoring device based on triboelectric nanogenerator for self-powered aniline early warning[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(5): 1901087.
- [50] SU Y J, YANG T N, ZHAO X, et al. A wireless energy transmission enabled wearable active acetone biosensor for non-invasive prediabetes diagnosis[J]. *Nano Energy*, 2020, 74: 104941.
- [51] WANG D Y, ZHANG D Z, CHEN X Y, et al. Multifunctional respiration-driven triboelectric nanogenerator for self-powered detection of formaldehyde in exhaled gas and respiratory behavior[J]. *Nano Energy*, 2022, 102: 107711.
- [52] KIM I, ROH H, KIM D. Willow-like portable triboelectric respiration sensor based on polyethylenimine-assisted CO_2 capture[J]. *Nano Energy*, 2019, 65: 103990.
- [53] SHIN S H, KWON Y H, KIM Y H, et al. Triboelectric hydrogen gas sensor with Pd functionalized surface[J]. *Nanomaterials*, 2016, 6(10): 186.
- [54] UDDIN A S M I, CHUNG G S. Wide-ranging impact-competent self-powered active sensor using a stacked corrugated-core sandwich-structured robust triboelectric nanogenerator[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 245: 1-10.
- [55] UDDIN A S M I, YAQOUB U, CHUNG G S. Improving the working efficiency of a triboelectric nanogenerator by

- the semimetallic PEDOT: PSS hole transport layer and its application in self-powered active acetylene gas sensing [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(44): 30079-30089.
- [56] ZHANG W L, ZHAO J M, CAI C C, et al. Gas-sensitive cellulosic triboelectric materials for self-powered ammonia sensing[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(30): e2203428.
- [57] CHANG C Y, CHENG Y H, HO C Y. Surface engineering of a triboelectric nanogenerator for room temperature high-performance self-powered formaldehyde sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(42): 22373-22389.
- [58] WANG H, WU H, HASAN D H, et al. Self-powered dual-mode amenity sensor based on the water-air triboelectric nanogenerator[J]. *ACS Nano*, 2017, 11(10): 10337-10346.
- [59] KHANDELWAL G, CHANDRASEKHAR A, PANDEY R, et al. Phase inversion enabled energy scavenger: A multifunctional triboelectric nanogenerator as benzene monitoring system[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 282: 590-598.
- [60] MA H Z, LUO C, ZHAO J N, et al. Metal-organic framework based triboelectric nanogenerator for a self-powered methanol sensor with high sensitivity and selectivity[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(31): 37563-37570.
- [61] ZHONG T Y, ZHANG M Y, FU Y M, et al. An artificial triboelectricity-brain-behavior closed loop for intelligent olfactory substitution[J]. *Nano Energy*, 2019, 63: 103884.
- [62] DUAN Z H, LI J, YUAN Z, et al. Capacitive humidity sensor based on zirconium phosphate nanoplates film with wide sensing range and high response[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 394: 134445.
- [63] ZHANG Y J, WU Y W, DUAN Z H, et al. High performance humidity sensor based on 3D mesoporous Co_3O_4 hollow polyhedron for multifunctional applications[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 585: 152698.
- [64] DUAN Z H, ZHAO Q N, LI C Z, et al. Enhanced positive humidity sensitive behavior of p-reduced graphene oxide decorated with n- WS_2 nanoparticles[J]. *Rare Metals*, 2021, 40(7): 1762-1767.
- [65] XIA K Q, ZHU Z Y, FU J M, et al. Multifunctional conductive copper tape-based triboelectric nanogenerator and as a self-powered humidity sensor[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(6): 2741-2745.
- [66] LUO Y, CAO X, WANG Z L. Self-powered smart agriculture sensing using triboelectric nanogenerators based on living plant leaves[J]. *Nano Energy*, 2023, 107: 108097.
- [67] MIZES H A, CONWELL E M, SALAMIDA D P. Direct observation of ion transfer in contact charging between a metal and a polymer[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(16): 1597-1599.
- [68] MCCARTY L S, WHITESIDES G M. Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: Contact electrification of ionic electrets[J]. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 2008, 47(12): 2188-2207.
- [69] KIM W G, KIM D W, TCHO I W, et al. Triboelectric nanogenerator: Structure, mechanism, and applications [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(1): 258-287.
- [70] ZHANG M X, ZHANG B Y, YUAN Z, et al. Electrochemical humidity sensor enabled self-powered wireless humidity detection system[J]. *Nano Energy*, 2023, 115: 108745.
- [71] WANG N N, ZHENG Y B, FENG Y G, et al. Biofilm material based triboelectric nanogenerator with high output performance in 95% humidity environment[J]. *Nano Energy*, 2020, 77: 105088.
- [72] WANG N N, FENG Y G, ZHENG Y B, et al. New hydrogen bonding enhanced polyvinyl alcohol based self-charged medical mask with superior charge retention and moisture resistance performances[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(14): 2009172.
- [73] WANG N N, ZHANG W H, LI Z B, et al. Dual-electric-polarity augmented cyanoethyl cellulose-based triboelectric nanogenerator with ultra-high triboelectric charge density and enhanced electrical output property at high humidity[J]. *Nano Energy*, 2022, 103: 107748.
- [74] GUO H Y, CHEN J, TIAN L, et al. Airflow-induced triboelectric nanogenerator as a self-powered sensor for detecting humidity and airflow rate[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(19): 17184-17189.
- [75] MA M Y, LIAO Q L, ZHANG G J, et al. Self-recovering triboelectric nanogenerator as active multifunctional sensors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(41): 6489-6494.
- [76] ZHANG L Y, LI H, XIE Y Y, et al. Triboelectric nanogenerator based on Teflon/vitamin B_1 powder for self-powered humidity sensing[J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2020, 11: 1394-1401.

- [77] DING Z Y, 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.
- [78] 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.
- [79] PENG Y F, LONG Z H, LIANG S, et al. A battery-free music-driven humidity sensor for intelligent wearable sensing system in smart diaper[J]. *Smart Material Structures*, 2023, 32(2): 025016.
- [80] SHRESTHA K, SHARMA S, PRADHAN G B, et al. A siloxene/ecoflex nanocomposite-based triboelectric nanogenerator with enhanced charge retention by MoS₂/LIG for self-powered touchless sensor applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(27): 2113005.
- [81] SARDANA S, SINGH Z, SHARMA A K, et al. Self-powered biocompatible humidity sensor based on anelectrospun anisotropic triboelectric nanogenerator for non-invasive diagnostic applications[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 371: 132507.
- [82] RASEL M S, MAHARJAN P, RAHMAN M T, et al. Highly responsive and robust micro-/ nano-textured self-powered triboelectric humidity sensor[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2021, 3(10): 4376-4387.
- [83] MOHAN V, MARIAPPAN V K, PAZHAMALAI P, et al. Unravelling the impact of carbon allotropes in flexible polydimethylsiloxane film towards self-powered triboelectric humidity sensor[J]. *Carbon*, 2023, 205: 328-335.
- [84] WANG J, XIA Z Y, YAO H, et al. Self-powered TENG with high humidity sensitivity from PVA film modified by LiCl and MXene[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(40): 47208-47220.
- [85] YANG Z, YANG Y Y, WANG H, et al. Charge pumping for sliding-mode triboelectric nanogenerator with voltage stabilization and boosted current[J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(28): 2101147.
- [86] YU Y H, WANG X D. Chemical modification of polymer surfaces for advanced triboelectric nanogenerator development[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2016, 9: 514-530.
- [87] WANG J, WU H Y, WANG Z, et al. An ultrafast self-polarization effect in Barium titanate filled poly (vinylidene fluoride) composite film enabled by self-charge excitation

triboelectric nanogenerator[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(35): 2204322.

作者简介



刘勃豪 男, 1995年10月出生于湖南省娄底市. 现为电子科技大学博士研究生. 主要研究方向为电阻型、摩擦电型气湿传感器.
E-mail: 2991413138@qq.com



谢光忠 男, 1968年8月出生于四川省内江市. 现为电子科技大学教授、博士生导师. 研究方向为敏感材料与传感器技术.
E-mail: gzxie@uestc.edu.cn



段再华 男, 1991年12月出生于四川省广安市. 现为电子科技大学讲师. 主要研究方向为敏感材料与传感器. 中国电子学会会员编号: E190031083M.
E-mail: zaihuaduan@uestc.edu.cn



袁震 男, 1991年1月出生于山西省太原市. 现为电子科技大学副教授、硕士生导师. 主要研究方向为微结构传感器、功能材料及其在气体、应变和汗液传感领域的应用.
E-mail: zyuanyuan@uestc.edu.cn



蒋亚东 男, 1964年2月出生于重庆市. 现为电子科技大学教授、博士生导师. 主要研究方向为光电材料与器件、敏感材料与传感器.
E-mail: jiangyd@uestc.edu.cn



太惠玲 女, 1979年4月出生于宁夏回族自治区固原市. 现为电子科技大学教授、博士生导师. 主要研究方向为聚合物基敏感材料以及传感器应用.
E-mail: taitai1980@uestc.edu.cn