

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

D17-智能传感功能材料与器件
D17-Smart Sensing Functional
Materials and Devices

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

D17. 智能传感功能材料与器件

分会主席：毛昌辉、任天令、朱建军、付振晓、杨志民

报告

D17-01 (Keynote)

基于二维材料的智能传感器件与系统

任天令

清华大学信息科学技术学院

D17-02 (Invited)

低维半导体材料器件与触觉仿生

潘曹峰*

北京航空航天大学

触觉感知是人工智能的核心之一。通过电子手段模拟人的感知一直是人工智能领域的重大挑战，相比于发展较为成熟的几种感观（视觉、听觉、嗅觉和味觉）的微纳敏感器件仿生，触觉的仿生还是一个尚未攻克的难题。围绕传统触觉传感器阵列集成度与分辨率低、无法兼顾高灵敏度与宽线性响应、柔性可延展性差等难题，提出通过调控低维半导体结构-界面-能带来探测应力的思路，开展触觉传感全链条研究，成功构筑了人工智能机器触觉，针对集成度与分辨率低等，创新性地构筑 ZnO 纳米线阵列并以其发光特性来探测应力，实现千万级像素集成 2 微米超高分辨率的世界领先的触觉传感阵列；针对灵敏度与线性检测范围等，构筑了微米级超薄复合可拉伸传感材料，阐明多级次结构-力学-系统应变的内在关联，实现了宽线性响应和 389dB 超高灵敏度的多物理量柔性触觉传感；实现微细动作精确操控与触觉感知，成功集成到智能假肢与机器人上，实现物体的准确可控抓握，使机器人实现触觉传感功能。

D17-03 (Invited)

Future of Induced Volatolomics in Cancer Risk Pre-warning

Han Jin*

Shanghai Jiao Tong University

Induced volatolomics provides a promising approach for cancer risk pre-warning. Nevertheless, continues to be questioned bio-compatibility of the synthetic exogenous agents and sophisticated instrument solely detectable isotopes labeled volatile compounds restrained the induced volatolomics in clinic application. Here, we report a natural compound as the potential exogenous agent of induced volatolomics. The exogenous agent demonstrates satisfactory bio-compatibility in pilot study and metabolizes into volatile compound-base breath marker under the action of tumor micro-environment highly accumulated enzyme. For conveniently recording breath signal, handheld breath-analyzer based on electrochemical gas sensor is developed. After administrating healthy or tumor bearing mice with the proposed exogenous agent, breath signal given by breath-analyzer is verified to be capable of not only predicting various tumor risk with specificity/sensitivity/accuracy above 94.3% in 10 min, but also speculating tumor stage.

D17-04 (Invited)

柔性、透明太赫兹电磁屏蔽薄膜与器件

桂许春*, 杨少钿, 陈梓博

中山大学

近年来，太赫兹技术在安检、信息通信等领域快速发展，开发太赫兹电磁屏蔽材料对于确保电磁防护

和信息安全至关重要，因而备受关注。本报告将首先介绍利用旋涂与界面成膜的方法制备得到的 MXene 基柔性透明薄膜。薄膜对可见光透过率最高达到 71.8%，并且在 0.1-10.0 THz 的频率范围内实现了 700 dB/ μm 的比电磁屏蔽效能。同时，表面具有褶皱结构的 MXene 薄膜在拉伸形变条件下，具有良好的电学性能与电磁屏蔽效能的稳定性。进一步，通过梯度组装的方法，调控 MXene 纳米片与羟丙基甲基纤维素（HPMC）含量，使 MXene 纳米片的比例沿薄膜厚度方向梯度变化，得到了电导率沿厚度方向梯度变化的 MXene 梯度薄膜。梯度薄膜对 0.2-1.6 THz 电磁波具有强吸收能力，吸收率达到 91.4%。该 MXene 梯度薄膜表现出对红外范围电磁波高达 95.5% 的吸收率。最后，通过裂纹模板法制备了可拉伸的金属网格透明薄膜。薄膜对可见光透过率为 85.8%，方阻为 0.18 $\Omega/\square$ ，FoM 系数达到 13,232，其对 0.2-1.6 THz 频段范围的电磁波的平均电磁屏蔽效能达到 18.1 dB。

D17-05 (Invited)

仿生柔性传感器件及系统

李阳*

山东大学

传统的电子皮肤（e-skin）由于缺乏类似人类大脑的思考和判断能力，无力加速向智能时代迈进。在此，本工作提出了人工智能（AI）驱动的全皮肤仿生（FSB）电子皮肤，它由人类的毛发、表皮-真皮-表皮的结构组成。得益于双重交错的分层微锥结构和超电容离子效应，FSB 电子皮肤表现出 8053.1 kPa^{-1} (<1 kPa) 的超高灵敏度，3103.5 kPa^{-1} (1-34 kPa) 的线性灵敏度，以及 <5.6 ms 的快速响应/恢复时间。此外，它还可以在配备“大脑”后，实现从触觉感知到高级智能触觉认知的进化。首先，基于绒毛仿生学的三电效应，实现静态/动态非接触触觉感知。其次，基于表皮-真皮-表皮的结构仿生学的超电容离子效应和五层多层感知（MLP）实现了手势认知和机器人无线操控的人机交互的一般智能触觉认知。此外，通过充分利用 FSB 电子皮肤与六层 MLP 神经网络，开发出先进的智能材料认知系统，通过一次接触实时认知多达 12 种不同物体材料种类和位置，超越了人类的能力。

D17-06 (Invited)

硼烯二维材料及其在高灵敏度传感器件中的应用

台国安*

南京航空航天大学

硼烯被视为一种卓越的传感材料，预计将在未来高性能传感设备中发挥重要作用。本报告将详细介绍我们课题组在硼烯的制备技术及其在传感器领域的应用研究。本研究的一个重点是硼烯光电探测器，其特点是利用硼烯显著的等离子体增强特性，使基于硼烯-石墨烯异质结构的光电探测器显示出高度的光电响应。此外，通过化学气相沉积（CVD）方法制备的 β 相硼烯，在与硅结合后，构成的光电探测器展示了对紫外线的敏感响应。硼烯气体传感器以其高灵敏度、快速响应、优异的选择性、良好的柔韧性及稳定性而脱颖而出。这种传感器的实验检测限可低至 200 ppb，检测范围从 200 ppb 到 100 ppm，并具有快速的响应时间（30 秒）及恢复时间（200 秒），这些性能指标均优于其他已报道的典型二维材料传感器。为了进一步提升硼烯的性能，我们还通过范德华异质结的构建，显著提升了器件性能。我们的团队还利用范德华外延生长技术，制备了硼烯-石墨烯和硼烯- MoS_2 的异质结构，这些新型传感器显示出极高的灵敏度。这些传感器在人体呼吸诊断和非接触式开关传感系统中的多功能应用，显示了基于硼烯的传感器在未来医疗保健和人机交互系统中的巨大潜力。

D17-07(Invited)

防腐吸波材料初探与机制研究

马嵩*

中国科学院金属研究所

以三聚氰胺为前驱体，利用真空浸渍和碳化技术，制备了由 3D 多孔碳骨架、1D 碳纳米长管、碳纳米短管与 Ni_3Fe 纳米颗粒所构成的三维磁性-介电仿生类神经网络纳米复合结构。利用此结构的特点，极大加

速了电子传输,形成了以电导损耗为主导的介电高度可调的纳米复合吸波材料。在 10 wt%填充比例,吸波体厚度 2.35 mm 下,实现 6.4 GHz 的有效带宽。另外,通过化学惰性碳骨架和碳管网络的疏水特性,保护了 Ni_3Fe 纳米颗粒,使之磁性不被影响,从而实现此类材料的吸波防腐功能特性。

D17-08

纤维基生物传感器件构筑及性能研究

卿星*

武汉纺织大学

便携、快速、准确的生物传感器在疾病防控,智能监测以及个体化医疗等领域具有巨大市场前景。近年来,纤维基有机电化学晶体管因其低工作电压和高信号放大功能,在生化传感领域引起广泛关注。本研究创造性地提出以具有超柔顺性和三维贴合性的纤维材料为基材,通过构筑具有高灵敏度、低检测下限、宽检测区间的纤维基有机电化学晶体管生化传感器,实现葡萄糖、多巴胺、尿酸、C 反应蛋白等生理标志物实时监测;同时,采用一体化织造技术将热电单元和晶体管传感单元集成,制备全纤维基热电驱动生理信号监测器件。当人体与环境温差为 2.2K 时,热电织物可有效驱动葡萄糖传感器工作,实现宽传感区间、优异的抗干扰性和可靠的重复性,为大面积集成均质化自供电生化传感织物提供了新的研究思路。

D17-09(Invited)

微光夜视用光电材料探讨

程宏昌*

北方夜视研究院集团

通过回顾微光夜视技术发展历程,综合分析其“一代”到“三代”微光夜视仪发展过程中涉及的多种光电材料,如超二代多碱阴极(Sb-K-Na-Cs)、三代光电阴极(GaAs)等,提出未来微光夜视用光电材料的设想,以便支撑新一代微光夜视技术的突破和进展。

D17-10(Invited)

智能传感功能材料与器件

曾中明

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所

中国科学院苏州纳米所纳米加工平台是国内开放度最大的高水平公共服务平台,具备微电子、光电子、物理和纳米科技等领域的新材料生长、工艺开发、器件制备能力,建设了 PLD、ALD、MOCVD、MPCVD 和磁控溅射等功能材料生长硬件,开发了压/铁电材料(PZT 、 $\text{Al}(\text{Sc})\text{N}$ 和 HZO)、化合物半导体材料(GaN 、 SiC 、 Ga_2O_3 和金刚石等)、二维材料(h-BN 等)等材料制备/加工能力,依托平台 6/8 英寸微加工工艺线发展了压电 MEMS、功率器件、原子器件、自旋微波器件和光电器件等多项微纳器件共性加工技术,形成了高电子迁移率晶体管、原子磁力计、薄膜体声波滤波器、压电超声换能器、磁电器件、自旋类脑器件、双色光电探测器、Micro-LED 等特色器件,助力智能传感功能材料与器件产业发展。

关键字: 共性技术, 压电薄膜, 铁电薄膜, 化合物半导体材料, 二维材料

D17-11(Invited)

薄膜晶体管多模式传感器件研究

朱国栋*, 张群

复旦大学

接近传感和接触传感在物联网、可穿戴设备、机器人等领域有着广泛应用前景。以人机交互环境为例,基于接近传感器,机器人可发现并跟踪目标物的靠近,从而采取必要的应对措施,避免潜在的碰撞风险。理论上任何的长程相互作用,如磁场、静电、超声、光等,都可应用于接近传感器件的设计中。而接触传感则可量化目标物与机器人之间的作用,方便机器人对目标物进行各类操作。常见的接触传感原理包括压电式、压阻式、电容式、摩擦电式等。近年来研究人员致力于开发多种传感功能合一的多模式传感器件,极大简化器件加工工艺并提升了器件集成性。报告人将介绍团队在柔性铁电薄膜晶体管多模式传感研究领域

的工作。团队将薄膜晶体管与压电聚合物 P(VDF-TrFE)集成, 构建具有紧凑结构及拓展栅结构的铁电晶体管接近、接触、温度三合一型传感器件。目标物与传感端的静电作用有效调控晶体管阈值电压, 进而导致源漏电流改变, 实现接近传感功能; 借助铁电聚合物的压电性能则可进一步实现静态及动态应力(应变)传感功能; 借助铁电聚合物的热释电效应实现铁电晶体管温度传感功能。所开发铁电晶体管具有良好柔性, 在多次弯曲操作后依然保持优良的传感性能。

D17-12(Invited)

多中心发光配合物的合成与传感功能调控

师唯*

南开大学

以功能为导向的配位化学研究一直处于无机化学的前沿。围绕配合物的结构设计与功能调控, 我们开展了系列的研究工作^[1-15], 系统研究了多组分配合物的合成、分子和能级结构, 以及在外界化学刺激下的发光性质变化规律。主要研究成果包括: (1) 发展了系列新型多中心发光配合物, 通过对多个重要体系组成和结构的精确调控, 探索了这些配合物的合成规律, 研究了发光性质; (2) 应用多中心发光配合物作为高效传感材料, 实现了对生物标志物、环境污染物和手性药物等功能有机分子的高效传感功能, 研究了这些体系的传感机理。

参考文献

- [1] S. Zhang, L. Lu, J. Jiang, N. Liu, B. Zhao, M. Xu, P. Cheng, and W. Shi, *Adv. Mater.* 2024, 202403464.
- [2] W. Lan, X. Gou, Y. Wu, N. Liu, L. Lu, P. Cheng, and W. Shi, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2024, 63, e202401766.
- [3] M. Wang, Z. Han, K. Wang, B. Zhao, T. Sun, Y. Wu, P. Cheng and W. Shi, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2024, 63, e202318722.
- [4] Z. Han, K. Wang, M. Wang, T. Sun, J. Xu, H.-C. Zhou, P. Cheng, W. Shi, *Chem.* 2023, 9, 2561.
- [5] Z. Han, R. Zhang, J. Jiang, Z. Chen, Y. Ni, W. Xie, J. Xu, Z. Zhou, J. Chen, P. Cheng, W. Shi, *J. Am. Chem. Soc.* 2023, 145, 10149.
- [6] Z. Chen, Y.-L. Lu, L. Wang, J. Xu, J. Zhang, X. Xu, P. Cheng, S. Yang, W. Shi, *J. Am. Chem. Soc.* 2023, 145, 260.
- [7] Z. Han, K. Wang, H.-C. Zhou, P. Cheng, W. Shi, *Nature Protoc.* 2023, 18, 1621.
- [8] N. Liu, J. Jiang, Z. Chen, B. Wu, S. Zhang, Y.-Q. Zhang, P. Cheng, W. Shi, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2023, 62, e202312306.
- [9] Z. Han, J. Li, W. Lu, K. Wang, Y. Chen, X. Zhang, L. Lin, X. Han, S. J. Teat, M. D. Frogley, S. Yang, W. Shi, P. Cheng, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022, 61, e202115585.
- [10] Z. Han, K. Wang, H. Min, J. Xu, W. Shi, P. Cheng, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022, 61, e202204066.
- [11] Z. Han, K. Wang, Y. Chen, J. Li, S. J. Teat, S. Yang, W. Shi, P. Cheng, *CCS Chem.* 2022, 4, 3238.
- [12] J. Liu, D. Xie, X. Xu, L. Jiang, R. Si, W. Shi, P. Cheng, *Nature Commun.* 2021, 12, 3131.
- [13] J. Du, J. Ren, M. Shu, X. Xu, Z. Niu, W. Shi, R. Si, P. Cheng, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2021, 60, 4142.
- [14] H. Liu, C.-Y. Chen, H. Yang, Y. Wang, L. Zou, Y.-S. Wei, J. Jiang, J. Guo, W. Shi, Q. Xu and P. Cheng, *Adv. Mater.* 2020, 32, 2004553.
- [15] Z. Han, K. Wang, Y. Guo, W. Chen, J. Zhang, X. Zhang, G. Siligardi, S. Yang, Z. Zhou, P. Sun, W. Shi, P. Cheng, *Nature Commun.* 2019, 10, 5117.

D17-13(Invited)

A 4.7-inch 650-PPI AMQLED display prepared by direct photolithography

Di Zhang, Zhuo Li, Shaoyong Lu, Dong Li, Zhuo Chen*, Yanzhao Li, Xinguo Li, Xiaoguang Xu

BOE Technology Group Co., Ltd

In this work, a highly efficient photosensitive quantum dot (QD) system was designed. The optimized photosensitive QD system had high photoluminescence quantum yield and colloidal stability. By direct

photolithography, RGB pixel arrays with a single sub-pixel size of $39\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ were successfully prepared. Further, the full-color QLED device was realized. There were no residual QD emission peaks from neighbor sub-pixels observed in the electroluminescence spectra. Experience on the full-color QLED device guided the successful preparation of a 4.7-inch 650 ppi active matrix QLED prototype. The active matrix QLED prototype could display clear and complete pictures. The color gamut reached 85% of the BT2020 standard. This is the first active matrix QLED prototype prepared with a record-high resolution by direct photolithography, which promoted the development of QLED display technology.

D17-14 (Invited)

基于近红外敏感性提升 CIS 光谱响应范围扩展研究

王秀宇*, 马彪, 徐江涛

天津大学

传统 CMOS 图像传感器 (CIS) 通常工作在 400~700 nm 的可见光波长范围, 但窄的光谱响应范围限制了其应用。如何扩展 CIS 的光谱响应范围、提高其对光的利用效率和成像质量, 是研究的热点和难点。扩展 CIS 的光谱响应范围, 光敏材料是关键。本文采取如下多种措施提高 CIS 对近红外光的吸收和成像质量: 基于深沟槽隔离 (DTI) 的深 N 阱光电二极管 (PD) 设计, 提高对长波长光的吸收; PD 的深 N 阱采用梯度掺杂以在复位时形成电势梯度, 提高曝光时的量子效率; 基于背照 PD 结构采用湿法刻蚀技术对硅表面进行纳米结构化处理形成黑硅, 一方面获得较小的表面反射率, 另一方面通过光的散射作用增加黑硅的光路长度, 从而提高对近红外光的吸收, 拓宽吸收波谱; 采用原子层沉积 (ALD) 技术制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合多功能膜, 一方面通过 Al_2O_3 膜钝化纳米结构化的硅表面、降低界面陷阱电荷噪声, 另一方面通过该复合膜的增透作用降低对近红外光的反射。研究表明, 上述方法能提高 CIS 对近红外光的吸收, 扩展光谱响应范围, 提高量子效率和成像质量。

D17-15

碳纳米管/环氧树脂纳米复合材料的非单调压阻性

黄挺叟, 余涛, 邹芳鑫*

香港理工大学

在应变传感领域中, 对于压阻型材料的一个基本要求是当材料受到机械形变时, 其电阻变化必须是单调的。作为一种具有巨大潜力的压阻型聚合物纳米复合材料, 碳纳米管 (CNT)/环氧树脂 (epoxy) 却时常展现出非单调的形变致电阻变化, 阻碍了其在应变传感中的应用。在之前的工作中 (Compos. Commun. 39 (2023): 101557), 我们明确了 CNT/epoxy 的压阻单调性可以通过改变固化温度来调控, 并将这种依赖性初步归因于 epoxy 网络结构的异质性, 即交联度在空间上的差异性。在本研究中, 我们通过将数值模拟和实验相结合, 探究了固化温度与 CNT 导电网络初始结构的关系, 并揭示了 CNT 导电网络初始结构对于形变致电阻变化的微观影响机制。本研究为 CNT/epoxy 所展示的非单调压阻性提供了分子层面的见解。

D17-16

Preparation of NiCr/NiSi Thin Film Thermocouple Sensors for Internal Temperature Measurement in Proton Exchange Membrane Fuel Cell Gas Channels

Zhihui Liu*

Tsinghua University

Methods for measuring the reaction temperature of the proton exchange membrane (PEM) in Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) can be categorized as contact and non-contact. Non-contact methods, like infrared thermometry and thermographic phosphor, due to their low spatiotemporal resolution, fail to capture the precise transient temperatures of the PEM. Existing contact methods are limited by their large size, poor heat and corrosion resistance, impacting PEM reactions. A new method has been developed using physical vapor deposition to apply NiCr/NiSi thin-film thermocouples on the PEM to accurately measure transient temperatures.

These thermocouples, with their micrometer-scale structures, are suitable for contact measurements in sealed environments, preserving the integrity of the seal. They provide a rapid response of 2.91 μs , effectively capturing the transient temperatures. Experimental results show that these custom-made thermocouples, measuring a stable reaction temperature of 83.7 $^{\circ}\text{C}$, are more accurate than infrared methods, which measured 82.4 $^{\circ}\text{C}$. They also reveal that the reactor's central cathode temperature is 1.7 $^{\circ}\text{C}$ higher than the edges, and the anode is 1.8 $^{\circ}\text{C}$ higher.

D17-17

碳纳米管导电纳米复合材料的电学理论表征

唐振华*

重庆大学

柔性导电纳米复合材料在电磁屏蔽、柔性电子、健康监测、航空航天等领域具有巨大的应用前景。导电纳米复合材料中填料的维度、尺寸、分布等的不确定性，导致其宏观性能难以准确预测。本研究针对目前碳纳米管（CNT）导电纳米复合材料的设计制造缺乏有效的理论指导，基于量子隧道导电理论建立了碳纳米管导电纳米复合材料的电学、力-电响应理论模型，探讨 CNT 尺寸、形貌等参数对其宏观电学特性的影响，理论计算结果与实验数据吻合较好；随后，提出获得具有优异电学和力-电响应特性的导电纳米复合材料的设计方案；最后，设计并构筑了基于 CNT/高分子纳米复合材料的高性能智能柔性传感器，包括柔性应变传感器、柔性压力传感器。本研究为研发新型、高性能柔性导电纳米复合材料提供了理论指导，具有重要科学意义。

D17-18

超声键合过程界面微观结构演化研究

张玉霖^{1,2,3}，曹瑞军*^{1,3,4}

1. 智能传感功能材料国家重点实验室
2. 有研（广东）新材料技术研究院
3. 北京有色金属研究总院
4. 有研工程技术研究院有限公司

集成电路产业是当今世界发展最为迅速和竞争最为激烈的产业之一，是电子工业的核心产业，属于国家战略性基础产业。从整个产业结构来看，集成电路半导体制造主要分为芯片制造和封装测试，在集成电路封装领域，引线键合已成为微连接领域最常用的技术。但国产劈刀在使用 10mil 粗铝丝/粗铜丝键合时仍存在可靠性不足等问题。本实验将 10 mil 粗铝丝/粗铜丝在不同工艺参数条件下，键合在 1060 铝基板和 T2 铜基板上，通过破坏性拉力测试键合点可靠性能，并结合扫描电镜、白光干涉仪、金相显微镜等多种分析测试手段，对失效后的键合界面进行形貌观测和成分分析，确定键合接头失效机理。结果表明，在粗铝丝-铜板键合压力组实验中，一焊点宽度在 540cN 时出现大幅变化，焊点形貌变为上窄下宽的“三角形”；粗铜丝较粗铝丝有更高的硬度，在相同线径下键合时所需要的超声功率和键合压力都要比粗铝丝高，相应的平均拉断力数值也更高。

D17-19

基于涡旋磁阻传感芯片的高精度非侵入式微弱电流传感器研究

刘佳明，关蒙蒙，苏玮，王志广，胡忠强*，刘明

精密微纳制造技术国家重点实验室，西安交通大学电子科学与工程学院，电子陶瓷与器件教育部重点实验室与国际电介质研究中心

隧穿磁阻（TMR）传感器具有高灵敏、宽频带、低功耗等优势，在磁探测、电流传感等领域展现出巨大的应用前景。但其存在软磁性材料引入的磁滞，且磁场线性探测范围较小。本研究将低各向异性的复合自由层引入 TMR 结构中，并对其形状、尺寸进行调控设计，在 TMR 自由层中成功诱导涡旋态的磁畴结构，具有极低的磁滞，并实现了传感器量程的大范围调控。经过优化后的 TMR 芯片磁滞可低于 0.1%，量程可

在近两个数量级的范围内灵活调整,提升了 TMR 传感器的测量精度,并使其能够应对不同场景的使用需求^[1]。基于该 TMR 芯片,我们设计了高精度非侵入式电流传感器模组,采用双芯片差分设计,在磁环气隙处反平行布置两颗 TMR 传感芯片,进一步提升了传感器的检测极限,在 DC~16 kHz 带宽下,对于微弱电流的探测极限分别达到 800 μA (直流)和 300 μA_{rms} (交流)。基于涡旋 TMR 传感芯片的非侵入式交直流电流传感器在漏电检测、绝缘监测等领域具有重要的应用价值^[2]。

参考文献

[1] J. Liu, M. Guan, Y. Gong, F. Ni, X. Gao, W. Su, Z. Wang, Z. Jiang, Z. Hu, and M. Liu, "Low Hysteresis and High Stability in Tunneling Magnetoresistance Vortex Sensors with a Composite Free Layer," IEEE Electron Device Letters, accepted, doi: 10.1109/LED.2024.3401830. (2024)

[2] J. Liu, M. Guan, Y. Xu, S. Zhao, W. Su, C. Zhang, Z. Wang, X. Zhang, Z. Hu, Z. Jiang, and M. Liu, "Enhanced Limit-of-Detection of Current Sensor Based on Tunneling Magnetoresistive Effect With Multichips Differential Design," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 72, 2008009, doi: 10.1109/TIM.2023.3322494. (2023)

D17-20

高性能水凝胶植物应变传感器的设计、制备及应用

王莉娜, 陈文娜, 卢宝阳*

江西科技师范大学

植物应变传感器作为感知植物生长的一种监测设备,可以直观显示作物生长信息以便调整其生长环境,有利于提高作物品质和产量。然而现有植物应变传感器存在性能不足,加工技术繁琐及系统集成难等问题,极大地限制其在植物领域的实际应用。基于此,通过材料设计、一体化 3D 打印技术和无线传感系统集成等研究,探讨了水凝胶应变传感器在植物传感领域的应用价值。具体研究内容及结果总结如下:

(1) 为了实现水凝胶应变传感器对植物生长的及时监测,设计了具有低迟滞、抗疲劳的 PVA-AC 导电水凝胶应变传感器。该策略通过相工程调控聚乙烯醇(PVA)和导电颗粒活性炭(AC)界面相互作用,制备具有均相结构的导电水凝胶。该 PVA-AC 导电水凝胶展现出高拉伸性(> 300%)和抗疲劳($\Gamma_0 = 40.87 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)的力学性能,同时还具有低迟滞(< 1.5%)、高线性度(~ 0.98)和长期稳定的传感性能,基于上述特性,探索其在植物生长监测中的应用。

(2) 现有的植物应变传感器灵敏度不足且精密加工难,通过采用 3D 打印策略,调控多材料打印墨水参数,制定打印路径,设计不同传感层结构图案,实现了高灵敏度 PEDOT:PSS-PVA 水凝胶植物应变传感器的一体化制备。结果表明该传感器件具有较高的灵敏度(12.78),且能实现对植物各向异性生长的检测。

(3) 为了推进智能农业的发展,将高性能水凝胶应变传感器和蓝牙模块集成,构建了无线应变传感系统,实现植物生长的实时监测。该系统由透明、可呼吸、高拉伸有机水凝胶的数据采集模块、数据分析模块和移动设备组成。在植物生长监测中,证明该系统可以实现理想环境和非生物胁迫环境下草莓生长趋势的实时监测,为有机水凝胶材料在植物传感领域的应用提供了有力支持。

综上所述,基于水凝胶材料设计、3D 打印技术和无线传感系统集成实现对植物生长监测的探索,为导电水凝胶在植物传感领域的发展提供了理论研究。

参考文献

[1] Lina Wang, Zhilin Zhang, Baoyang Lu, et al. Polymers, 2023, 15(1): 90.

[2] Lina Wang, Wen Wang, Rongtai Wan, Jingkun Xu, Ximei Liu, Baoyang Lu, et al. (Chemical Engineering Journal, Under review).

[3] Lina Wang, Wenna Chen, Wen Wang, Ximei Liu, Baoyang Lu, et al. (Carbohydrate Polymers, In revision).

D17-21

Pd/Y 合金基氢敏薄膜的相组成设计与响应优化研究

李源森^{1,2}, 魏智杰¹, 兰越景¹, 周琳森¹, 杨亚杰², 任广坤^{*1}

1. 中国工程物理研究院材料研究所

2. 电子科技大学

钯基传感器具有突出的氢选择性，在气体检测领域应用广泛，但低响应限制了其进一步相关应用。本工作采用多靶磁控溅射技术系统制备了 Pd/Y 合金薄膜，并通过调节退火温度和 Y 元素占比优化了相组成，使得氢敏性能得到提升。结果表明，退火温度为 500°C、Pd/Y 比为 74.1/25.9 的薄膜在 50°C 时对 4 wt.%H₂ 的响应最高，达到 19.2%，检测下限为 10 ppm，并具有探测范围宽（10 ppm ~ 4 wt.%）、选择性好、重复性高等特点。在此基础上，基于 XPS 等物相表征方法和第一性原理计算，对其氢敏性能变化的潜在机制进行了深入讨论，发现性能提升主要归因于形成了具有最佳晶格尺寸的 Pd₃σY (σ>0) 相，这为氢原子扩散提供了合适的通道，并进一步提升了溶解度。本工作表明，基于相组成设计策略可以大幅优化 Pd/Y 基氢敏材料的响应性能，并有望进一步应用于特殊环境的气体检测。

D17-22

α-Fe₂O₃ 纳米颗粒在 NO 气敏测试中的 p-n 型响应转换机制研究

杨润基^{1,2,3}，魏峰*^{1,2}

1. 智能传感功能材料国家重点实验室
2. 有研（广东）新材料技术研究院
3. 北京有色金属研究总院

NO 具有较为复杂的化学特性，是气体传感领域的重要研究对象。Fe₂O₃ 是一种对氮氧化物较为敏感的气敏材料，基于 Fe₂O₃ 的半导体传感器已被广泛应用于氮氧化物的检测中。本文采用水热法制备 α-Fe₂O₃ 纳米颗粒，以其作为敏感材料制备的传感器对 100 ppm NO 气体具有明显响应，传感器随工作温度变化表现出不同的传感行为。采用朗缪尔等温吸附模型拟合分析传感曲线，推导不同温度下可能发生的反应，计算相应的活化能，构建了温度调节下的反应变化模型。根据拟合结果和传感器响应值的变化，提出了 200-400°C 工作温度范围内传感器的 p-n 型响应转换机制。具体可以分为 275°C 以下 p 型响应区，325°C 以上 n 型响应区，以及 300-325°C 间的 p-n 型响应过渡区。气体选择性实验证明，根据 p-n 型响应转换机制，可以通过调节工作温度实现对 NO 目标气体的选择性检测。

D17-23 (Invited)

高端 MLCC 用低温烧结端浆研究进展

曹秀华

广东风华高新科技股份有限公司

针对 M 端电极对高端 MLCC 可靠性的影响，系统分析端电极造成 MLCC 失效的根本原因，并分别从端电极结构、端电极材料、封端工艺技术、低温烧结技术、端电极表面处理技术等提升高端 MLCC 可靠性的解决方案。

关键字：多层陶瓷电容器，低温烧结铜端浆，烧结应力，可靠性

D17-24 (Invited)

基于微纳裂纹的柔性应变传感器及其应用研究

张广平*，吴绪苹，罗雪梅

中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家研究中心

柔性应变传感器是柔性电子设备中的基础性核心元件之一，其在人机交互、医疗健康、软体机器人、人工智能等领域有广泛的应用前景。基于微纳裂纹的柔性应变传感器由于具有灵敏度高、制备方法简单以及选材范围广等优点而成为最具发展前景的柔性应变传感器之一。然而，在传感层引入微纳裂纹的同时，往往带来了裂纹微观结构调控困难、传感器循环稳定性差以及环境耐受力差等瓶颈问题，从而限制了传感器的应用。本报告首先介绍了一种柔性基底薄膜材料拉伸可靠性评估的普适性方法，为裂纹式柔性应变传感器的制备提供力学基础。随后针对上述裂纹式柔性应变传感器发展所面临的关键问题，通过调控传感材料的微观结构、调整裂纹制备方法以及对传感层进行功能结构设计，分别对裂纹式柔性应变传感器的灵敏度、循环稳定性及环境耐受力进行了研究，在深入阐述传感器传感机制的基础上，设计并制备了多种具有优异传感性能的裂纹式柔性应变传感器，所发展的器件在人体运动信号检测、气流检测以及机器人运动检

测等领域表现出良好的应用能力。最后结合机器学习、用户界面设计等技术搭建了无线、可穿戴的人机交互系统，实现了实时手语翻译等功能，对裂纹式传感器的场景应用进行了深入探索。本研究对于阐明裂纹式柔性应变传感器的稳定增敏机制，设计制备高性能的柔性应变传感器，推进裂纹式柔性应变传感器的实用化具有重要意义。

D17-25 (Invited)

碳基柔性触摸定位传感器序构设计与应用研究

廖新勤*

厦门大学

触摸定位传感器在可穿戴电子设备、虚拟现实、增强现实以及元宇宙等方面具有重要应用前景。通常，触摸定位传感器由具有 $M \times N \times 2$ 电极阵列的传感元件阵列组成，其中 M 和 N 表示导电经纬线，以准确识别触摸的位置。通过执行交叉扫描寻址模式，触摸定位传感器的电极将数量大幅减少到 $M \times N + 1$ 的电极阵列或 $M + N$ 的电极阵列，这大大缩短了测量周期，简化了信号处理和分析过程，降低了系统配置要求。碳基材料作为一种功能材料具有广泛的应用前景，可作为触摸定位传感器的功能敏感材料 (Liao, et al., Nano Energy, 2019, 62, 410; Nano Energy, 2019, 60, 127; Materials Horizons, 2018, 5, 920)。本次报告将介绍碳基柔性触摸定位传感器的构建 (Liao, et al., Nature Communications, 2020, 11, 268; Advanced Functional Materials, 2021, 31, 2101107; Nano Energy, 2021, 80, 105548; Nano-Micro Letters, 2022, 14, 131)，通过结构优化设计，只有两个电极线即可高效的实现单点和多点触摸定位识别。极简化的碳基柔性触摸定位传感器设计将有利于更低的信号串扰、快速的信号检测、更高的稳定性以及更低的系统配置要求，有助于人机交互系统的发展。

参考文献

- [1] Xinqin Liao, Weitao Song, Xiangyu Zhang, Chaoqun Yan, Tianliang Li, Hongliang Ren, Cunzhi Liu, Yongtian Wang, Yuanjin Zheng, Nature Communications, 2020, 11, 268 (IF: 17.694, 一区 TOP).
- [2] Xinqin Liao, Weitao Song, Xiangyu Zhang, Haoran Jin, Siyu Liu, Yongtian Wang, Aaron Voon-Yew Thean, Yuanjin Zheng, Advanced Functional Materials, 2021, 31, 2101107 (IF: 19.924, 一区 TOP).
- [3] Xinqin Liao, Wensong Wang, Liang Wang, Haoran Jin, Lin Shu, Xiangmin Xu, Yuanjin Zheng, Nano Energy, 2021, 80, 105548 (IF: 19.069, 一区 TOP).
- [4] Xinqin Liao, Wensong Wang, Longjie Zhong, Xinquan Lai, Yuanjin Zheng, Nano Energy, 2019, 62, 410 (IF: 19.069, 一区 TOP).
- [5] Cuirong Zhang, Mingyuan Wei, Zihan Chen, Wansheng Lin, Shifan Yu, Yijing Xu, Chao Wei, Jinwei Zhang, Ziquan Guo, Yuanjin Zheng, Qingliang Liao, Xinqin Liao, Zhong Chen, Nano Energy, 2024, 120: 109104 (IF: 17.6, 一区 TOP).
- [6] Chao Wei, Wansheng Lin, Shaofeng Liang, Mengjiao Chen, Yuanjin Zheng, Xinqin Liao, Zhong Chen, Nano-Micro Letters, 2022, 14, 131 (IF: 23.655, 一区 TOP).
- [7] Wansheng Lin, Chao Wei, Shifan Yu, Zihan Chen, Cuirong Zhang, Ziquan Guo, Qingliang Liao, Shuli Wang, Maohua Lin, Yuanjin Zheng, Xinqin Liao, Zhong Chen, Advanced Functional Materials, 2023, 33: 2305919 (IF: 19, 一区 TOP).

D17-26 (Invited)

基于先进微纳加工技术的仿生触觉传感器

牛阔森

济南大学信息科学与工程学院

触觉感知是指通过人体皮肤直接获取接触/非接触信息的能力，其实现主要依赖于皮肤内外独特而完美的生物结构。此外，触觉认知作为触觉感知更深层次的体现，它将皮肤获得的感知信息转化为生物电脉冲，进而以传入神经为载体传递到大脑的中枢神经系统。经过复杂的分析、处理和学习，可以获得更深层次的且难以直接测量的信息。这里，以先进微纳加工工艺为基础，结合仿生传感技术，开发适应于智能化进程的触觉传感器及其感知系统，包括：（1）以 AAO 为模板，通过熔融浸润得到了具有不同高度的纳米锥阵

列传感层，构成用于微小信号传感的仿生触觉传感器；（2）首次报道一种三步低温水热生长方法，可大规模制备用于构建触觉传感器传感层的纤维-纳米柱-纳米刺结构，在深度学习算法辅助下，开发出智能手势感知系统；（3）开发了一种基于仿生汗毛和表皮-真皮-皮下组织的高性能全皮肤仿生触觉传感器，并将其与神经网络以及多功能模块相结合，创新性地构建了先进智能材料认知系统。

关键字：触觉传感器，微纳加工，模板转移技术，溶液合成技术，感知与认知系统

D17-27 (Invited)

硅基微针电化学生物传感器及其性能研究

连紫薇^{*1,2}

1. 有研工程技术研究院有限公司
2. 中国有研科技集团智能传感功能材料国家重点实验室

近年来，由于无痛、半侵入性和持续性的优点，微针在药物输送、生物传感和液体提取等生物学领域引起广泛关注。微针的尖端可穿透皮肤的表皮层到达真皮层顶层，不触及神经末梢，从而避免出血和二次感染。在给药方面，其能在皮肤上形成微通道来传递分子药物，具有避免胃肠道影响，加速药物吸收、延长有效时间等优点；在生物传感方面，微针与生物传感器结合，进行生物标志物快速检测，有望应用于可穿戴及时检测（point-of-care testing, POCT）领域。

为了获得特定的微针形状、结构和功能，以实现目标生物学应用，目前存在的挑战是微针的材料和制造方法。本文提出了一种基于微针阵列的透皮检测系统，用于肿瘤标志物癌胚抗原的检测。首先设计开发了高密度硅基微针阵列，密度可达 10000 根/cm²，构建了生物标志物提取与电化学测试生物平台。通过巯基修饰适配体与金微针表面耦合，经过 DTT 处理，增强 Au-S 键结合，利用适配体与癌胚抗原特异性结合，检测电流变化，实现 CEA 快速检测。其检测限为 1.5 pg/ml，在 500 ng/ml-5 pg/ml 范围内，具有线性检测能力。通过凝胶模拟人工皮肤对微针强度和穿透深度进行验证。研发的微针生物传感器制作成本低、微型化、易实现大规模制作，在可穿戴生物标志物检测领域具有广阔应用前景。

D17-28 (Invited)

柔性压力传感器及其在人体健康监测中的应用研究

巫远招^{*}，刘宜伟，尚杰，李润伟

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

人体活动所产生的压力（如脉搏、呼吸等）包含大量生理信号，是医疗健康诊断与人体运动监测的重要数据来源。灵敏、精准、快速的获取人体活动产生的压力信号，对于开发医疗健康类可穿戴电子设备和新型人机交互界面具有十分重要的意义。传统的刚性传感器虽然具有优异的传感性能，但是难以解决人体穿戴的舒适性问题。近年来，柔性压力传感器具有柔软、轻便、易穿戴等突出特点，在人体健康监测等领域得到了广泛的应用，但还存在着抗应变干扰能力弱、信号难以兼容、监测参数单一等问题。基于此，我们重点围绕“柔性敏感材料开发→应力敏感结构设计→柔性压力传感器构建”开展研究。利用磁场取向技术，构建应变不敏感的可拉伸柔性压力敏感材料，研发出高灵敏度、低探测极限（10 μN）的数字化仿生触觉传感器，并研制出多功能弹性应变-温度传感器和弹性自供电应变传感器，在人机交互、运动/健康监测等领域实现演示应用。

D17-29 (Invited)

柔性纤维基柔性传感材料与器件的制备及应用

钟卫兵^{*}

武汉纺织大学

以镀银尼龙纱线为芯层，以结构化传感浆料为皮层，制备了皮芯结构纤维基压力传感材料用于构筑全纤维基压力传感器。通过调整皮层结构与模量，优化器件性能。结合有限元—快速傅里叶变换（FFT-FEM）方法对皮芯结构纱线传感层以及整体器件受力形变状况进行模拟计算，分析器件受压时表面传感层微观力学行为、整体器件介观力学行为，以此探究基于皮芯结构导电纱线压力传感器传感机理。基于皮芯结构纱

线的压力传感器优化后表现出优异的可集成性能，可用于人体脉搏信号、关节运动和足底压力的监测。在此基础上还进一步制备了大面积压力传感织物用于感知和绘制空间压力分布。在人类智能生活、个性化医疗、人机界面等领域显示出了巨大的应用潜力。

D17-30 (Invited)

面向运动检测的柔性可穿戴纤维基传感器

鲍艳*, 郭茹月, 高璐

陕西科技大学

近年来, 柔性可穿戴传感器在健康监测、疾病预防及人机界面等领域表现出卓越的性能和巨大的应用潜力, 且大多数纤维类产品因其柔性、可拉伸性和透气性已成为构建柔性可穿戴传感器的理想选择。其中, 皮革是一种动物皮经系列物理化学处理得到的天然纤维材料, 其独特的多级结构赋予了皮革优异的柔韧性、机械强度及可穿戴舒适性, 故本研究创新地提出在皮革的湿加工过程中将导电材料原位生长在胶原纤维上, 并结合传统鞣制工序获得导电性能优异、耐湿热性能稳定的皮革纤维基传感器, 实现对大范围关节运动的响应。进一步, 通过温度诱导聚乙烯醇基导电水凝胶在皮革中的“渗透-自组装”来构建皮革纤维基传感器, 利用皮革天然的孔隙结构和丰富的结合位点使水凝胶与胶原纤维间相互穿插并形成多重氢键作用, 从而产生形变放大效应来增强传感器的传感性能, 实现对人体面部表情、咽喉活动及小范围关节运动等准确实时监测。此外, 受皮革多层级和人体肌肉结构启发, 创新性提出基于导电聚氨酯纳米纤维膜制备出全向梯度褶皱型应变不敏感压力传感器和定向分段型压力不敏感应变传感器, 并通过相互堆叠获得可运动识别传感器。该传感器安装至机械手上, 可在外部干扰下自动调节抓取力, 从而稳定地抓取物体并避免滑移; 还能监测运动员不同角度下的罚球动作, 便于教练指导罚球动作。总之, 本研究所获得的柔性可穿戴纤维基传感器对人体活动监测和体育运动评估方面提供了巨大的潜力, 有望为柔性可穿戴纤维基器件的发展带来新的启发。

D17-31

面向锂电池热失控内置监测的多元协同感知机制研究

李毓祥*^{1,2}, 袁定凯³, 魏峰^{1,2}

1. 智能传感功能材料国家重点实验室

2. 有研(广东)新材料技术研究院

3. 云山工业(深圳)有限公司

锂电池在智能手机、新能源汽车等领域得到广泛应用。现今, 锂电池的能量密度不断提高, 热失控风险呈上升趋势, 容易导致爆炸等事故的发生。因此, 降低锂电池的热失控风险, 提高其使用安全性刻不容缓。当锂电池处于热失控早期阶段时, 其内部压力和温度会发生变化。因此, 对电池热失控初期内部的压力和温度等参数进行直接、及时探测, 并分析电池安全性与上述参量之间的关联, 可为高安全性电池的研发提供参考, 具有很强的意义。然而, 由于锂电池热失控形成机制复杂, 且内部环境苛刻, 需要对成品电池中感知器件多传感要素的协同感知机制开展研究。

为解决上述问题, 作者提出面向锂电池热失控内置监测的、基于压阻—热阻的压力—温度多元协同感知机制, 并分别选择金属泡沫与金属薄膜用于构筑压力和温度传感单元, 以此集成出基于该机制的多元协同感知器件。利用柔性金属泡沫在压力作用下孔隙率下降导致电阻降低来感知压力, 利用金属薄膜在温度作用下电阻升高来感知温度。因此, 泡沫和薄膜的电阻变化趋势相反, 互不干扰, 实现对电池环境中压力和温度变化的准确感知。将感知器件植入圆柱电池中, 实时采集器件在电池正常和受热、针刺状态下的数据, 并分析其差异, 为电池安全预警技术和评价体系发展提供参考。

D17-32

基于铌酸锂铁电极化的超灵敏石墨烯场效应生物传感器

金庆喜, 魏峰*

北京有色金属研究总院

石墨烯是一种零带隙半导体材料，由于其优异的电学特性、超高的比表面积、良好的生物相容性和表面可修饰特性，而被广泛应用在生物传感领域。近年来，石墨烯场效应晶体管（GFET）被广泛应用在疾病检测领域，在 GFET 中，被生物探针功能化的石墨烯能够特异性结合目标分子，探针与目标分子的结合改变的石墨烯的电学特性，从而产生易于检测的电学信号。在此，我们报道了一种基于铌酸锂（LiNbO₃）铁电衬底的新型超灵敏石墨烯场效应晶体管生物传感器，用于乳腺癌标志物的检测。在铁电基底自发极化产生的静电场作用下，石墨烯的电学性质发生了变化。与此同时，由于该静电场与溶液中离子的相互作用，导致石墨烯与溶液之间的界面性质也发生了改变。与基于传统 Si/SiO₂ 栅极结构的石墨烯场效应生物传感器相比，我们的生物传感器在检测 miRNA21（一种乳腺癌标志物）时达到了 64.7 mV/decade 的更高灵敏度，检测限（LOD）低至 1.7fM（相当于 12 fg·mL⁻¹）。这种将 GFET 与铁电衬底相结合的创新设计为开发基于石墨烯的超高灵敏度生物传感平台提供了另一种思路，有望实现快速和早期的疾病检测。

D17-33 (Invited)

用于人体呼出气体检测的气体传感器研制

朱丽萍*, 蒋杰, 郑子成

浙江大学

呼出气分析人体健康状况最早出现在古希腊时期，但是当时的医师只是经验而谈并没有对应特定的气体。近代随着检测技术的不断发展，1970 年 Phillips 等利用气相色谱-质谱法探究了 50 名正常人的呼出气组分，观察到了三千多种有机挥发性气体 VOCs 的存在。人体呼出气被视为血液顶空气体，通过肺泡交换排出体外，可在一定程度上反映人体的内源代谢情况。近些年，随着医学诊断无损化的不断发展，呼出气分析由于其无创性、无痛性、便捷性，具有临床疾病早期诊断与大规模筛查的潜力，受到越来越多的关注。大量疾病包括肺癌、胃癌、糖尿病、哮喘以及乳腺癌等，都拥有其特征的生物标志。

气体传感器在各个方面都拥有自身优势，但是在呼出气检测方面同样面临着一些问题。因为大量的气体传感器是以氧化物为基础的，氧化物作为传感材料氧负离子在表面与不同气体进行相对应的电子交换，完成交换后通过电学性能的变换来反映气体种类以及浓度。这项最基础的工作机理，一般需要干燥高温（300-400℃）的环境才能达到较为合理的结果。那么对于高湿度的呼出气而言，大量的水分子会占据有限的吸附位点，而且难以脱附。造成传感器的工作难度上升、精确度下降。同时过往的报道也都证实，纯氧化物由于其本身的电子结构当中能够参与气体响应的载流子有限，是无法胜任较低工作温度下的高灵敏度响应的。

为了使得金属氧化物气体传感器满足 ppb 级别人体呼出气检测的要求，需要进一步解决当前金属氧化物存在的三大问题，即工作温度较高、检测限较高、受湿度影响较大。针对前两个问题，贵金属以及结构改性是较为直接有效的手段。高湿度环境可以通过提高阈值满足测试要求，或者建立疏水层以隔绝水分子的影响。围绕以上问题，本团队经过深入的理论思考和实验积累，研究选取了不同类型的氧化物材料（氧化钴、氧化钨、氧化钨）作为气体传感器的敏感层。不同于传统敏感材料，选择了对于本征响应较好的新型氧化物。另一方面，设计了不同的纳米结构（纳米片、纳米球、纳米纤维、纳米针），独特的结构设计增大了敏感材料的比表面积从而增加与目标气体的接触时间与位点。合理的结构设计能够更好的提升性能的同时降低成本。最后的目标集中在，该传感器在经过一系列设计后将能够满足封装要求，作为一种原型器件用于糖尿病/肺癌/肠道疾病患者的初步筛查和自我检测。为开发应用于早期健康检查的高性能气敏材料和结构提供了新途径。

D17-34 (Invited)

分子材料与智能传感器件

李立强*

天津大学

智能传感器件在物联网、健康检测和人机交互等领域具有广阔的市场需求和发展前景。分子材料因其质轻柔性、结构可调、可低成本加工等优势成为构筑智能传感器的有力候选材料。近年来，我们团队在分子材料的组装调控和智能传感器件构筑方面开展了大量研究。（1）通过对石墨烯衍生物、有机半导体和

导电聚合物等分子材料的设计合成、结构改性和组装调控，成功制备了多种高性能物理传感器，实现了对力、热、光、气流等物理信息的高灵敏检测，取得了一系列创新研究成果；（2）针对分子材料稳定性较差的本征难题，我们揭示分子材料在高/低温、光照、内应力、外压力下的失稳机制，并在此基础上开发了相应增稳策略，大幅提升了分子材料和传感器件的稳定性。这些工作为分子材料的功能化设计与传感器件应用奠定了基础。

关键词：分子材料，传感器，稳定性

参考文献

[1] Chen X., Wang Z., Qi J., Hu Y., Huang Y., Sun S., Sun Y., Gong W., Luo L., Zhang L., Du H., Hu X., Han C., Li J., Ji D., Li L., Hu W., Balancing the film strain of organic semiconductors for ultrastable organic transistors with a five-year lifetime. *Nat. Commun.*, 2022, 13: 1480.

[2] Yuan L., Wang Z., Meng Y., Wang S., Sun Y., Huang Y., Li L., Hu W., Oxygen doping modulating thermal-activated charge transport of reduced graphene oxide for high performance temperature sensors. *Chin. Chem. Lett.*, 2023, 34(12): 108569.

[3] Wang Z., Guo S., Li H., Wang B., Sun Y., Xu Z., Chen X., Wu K., Zhang X., Xing F., Li L., Hu W. The Semiconductor/Conductor Interface Piezoresistive Effect in an Organic Transistor for Highly Sensitive Pressure Sensors. *Adv. Mater.*, 2018: 1805630.

D17-35 (Invited)

芯片式微型固态锂离子电池及智能微系统应用

黄晓东*

东南大学

作为后摩尔时代主要的技术路径之一，扩展摩尔通过将信息、能源、传感等不同类型集成在一起，实现集成电路性能与功能的提升。然而现有能源难以与集成电路兼容，因此，制约扩展摩尔的发展。该报告主要介绍本课题组在锂离子电池芯片化方面所作的努力，实现像制备集成电路一样制备片上微型薄膜电池，并通过设计、材料、结构与封装等方面的集成创新，全面提升电池的温区、容量密度、循环寿命与稳定性等性能，还开展在智能微系统中进行集成应用，推动后摩尔时代集成电路发展。

D17-36 (Invited)

纳米氧化物弥散强化铝合金的设计与耐热机制

张翔*, 白翔仁, 赵乃勤, 何春年

天津大学

航空航天领域提速减重的重大需求对轻质材料的耐热性能提出了更高要求，传统铝合金材料由于高温下析出相粗化力学性能急剧下降，300℃以上服役性能已达瓶颈。针对实现铝合金材料高热稳定性和高温力学性能突破这一关键科学问题，本课题组提出“界面置换”分散策略制备了亚 10 nm 氧化镁弥散强化铝合金，并实现了高温下稳定共格界面控制，探明了该材料的高温强化机理与蠕变机制，最终获得了具有突出高温稳定性、高温强度与高温蠕变性能的铝合金材料，也为发展新一代高强耐热铝合金材料提供了新思路。

D17-37 (Invited)

三元合金设计提升惰性环境用氢敏材料的响应特性

任广坤*

中国工程物理研究院材料研究所

面向厌氧气氛等特殊环境应用的氢敏材料研究具有重要意义，相关成果可用于开展气体与空间内部件及材料的原位反应研究，为完成部件工艺的更新提供一定技术支撑。基于 PCT 曲线的相关机制，钯（Pd）合金基材料表现出巨大的应用潜力，然而较长的响应/恢复时间和低响应幅值限制了其进一步应用。本研究通过引入 Pt 原子进入 Pd 晶格，并调节成分及制备工艺降低了形成 PdH_x 的反应活化能。实验结果表明，在 4 wt.% H₂-Ar 浓度下，30℃和 50℃条件下分别获得了 17.3s/407.1s 和 12.7s/25.9s 的响应/恢复时间。进一

步, 利用 Y 原子与 Pd/Pt 晶格相互作用优化三元合金相组成, 提升 H 原子溶解度的同时增大了不同 H₂-Ar 浓度下的响应, 最终在上述条件下获得 15% 的响应幅值和 5 ppm 的探测下限。三元合金设计可在降低响应及恢复时间的同时提高响应幅值, 结合器件良好的抗湿性和重复性、以及高选择性, 为优化惰性环境用氢敏材料的响应特性提供了有效策略。

D17-38 (Invited)

基于 SLAC1 和质子泵切换的离子传导型 MOF 基呼气 CO₂ 传感材料

陈弘浩, 岳晓蕊, 范逸飞, 李皓, 王耀*

华南师范大学

光合作用过程中植物气孔保卫细胞中质子泵和慢阴离子通道 (SLAC1) 的可逆激活机制的启发^[1,2], γ -环糊精-MOF (γ -CD-MOF) 被用来构建质子传导通道的主体结构。然后, 通过超分子组装将客体小分子 3,4,9,10-萘四羧酸 (PTCA) 封装到主体结构中^[3], 构建了一种 MOF-基离子传导型 CO₂ 传感材料 γ -CD-MOF@PTCA^[4,5]所制备的复合材料具有高灵敏度 ($R_g/R = 2.88$, 1000 ppm)、优异的选择性、良好的稳定性以及较低的实际检测限 ($pLOD = 1$ ppm)。通过使用萘衍生物进行控制实验, 证明了 γ -CD-MOF@PTCA 的离子传导机制为 CO₂ 控制的可切换 H⁺传导/HCO₃⁻扩散机制。更重要的是, 可以通过控制客体分子中的官能团含量来扩大氢键网络, 从而在分子水平上提高质子传导性。进一步地, 作为应用尝试, 该 γ -CD-MOF@PTCA 传感器被用于肺癌患者和健康受试者呼出 CO₂ 的检测。结果表明, 肺癌患者的呼气 CO₂ 响应的均值 (1.53, Response = R_g/R) 比健康受试者的呼气 CO₂ 响应均值 (1.27, Response = R_g/R) 高了 16.99%, 这表明 γ -CD-MOF@PTCA 传感器有望为肺部疾病的无创诊断提供辅助医用信息。

致谢: 国家自然科学基金面上项目 (51973070)、广东省自然科学基金面上项目 (2022A1515010577 和 2021A1515012420)、广州市科技计划 (2019050001)、广东省教育厅创新团队项目 (2018KCXTD009)、广东省国际科技合作项目 (2022A0505050069)、华南师范大学启动资金。

参考文献

[1] Chen Yu-hang, et al., *Nature*, 2010, 467(7319): 1074-1080.

[2] Du Qi-Shi, et al., *PLoS One*, 2011, 6(9): e24264.

[3] Shen Dengke, et al., *Journal of the American Chemical Society*, 2018, 140(36): 11402-11407.

[4] Chen Honghao, et al., *Journal of Materials Chemistry A*, 2023, 11(40): 21959-71.

[5] Chen Honghao, et al., CO₂-induced Switching between MOF-based bio-mimic slow anion channel and proton pump for Medical Exhalation Detection. (Submitted to *Chem. Eng. J.*, in revision)

D17-39 (Invited)

纳米银粉形貌控制及其在低温烧结上的应用

赵彦弘*

有研工程技术研究院有限公司

随着芯片 3D 叠层技术的发展, 芯片功率密度大大提高, 对芯片与热沉间互联材料的导热性提出更高要求。纳米银烧结技术可以实现低温连接、高温服役的要求, 且具有优异的导热导电性能和高温可靠性, 已成为近几年功率模块封装互连材料的研究热点。为了实现纳米银粉无压烧结, 提高烧结体导电导热性能, 需要对纳米银粉的尺寸、形状、结晶度及结构进行控制合成。对此, 我们深入研究了银粉的各向异性纳米结构的受控生长和组装, 设计合成了多面体颗粒、片状、棒状、锯齿型、花球型等多形貌纳米银粉, 并通过表面修饰及形貌控制使其定向排列, 增大粉体堆积密度, 提高烧结致密度, 进而增大烧结体的导电、导热性能。通过表面清洗控制了包覆层厚度, 调控了纳米粉体烧结微观形貌, 随包覆层厚度由大到小呈现出纳米片银呈现出球化失去烧结活性到线型烧结到体型烧结等不同烧结形貌, 其中体型烧结表现出最高的烧结强度, 在 200°C 烧结时可达 60MPa 以上的结合强度。

D17-40

基于拓扑梯度的金属薄膜基应变传感器

祝婷*

西安交通大学

金属薄膜基可拉伸应变传感器在各个领域具有广阔的应用前景,这要求传感器具有出色的灵敏度-可拉伸性-循环稳定性的协同作用。然而,金属薄膜基应变传感器的灵敏度-可拉伸性之间的权衡关系一直是一个长期存在的难题,同时由于金属薄膜与基体之间较大的机械失配而引起的弱的界面结合使其具有较差的循环稳定性,这二者极大地限制了应变传感器的实际应用。在本研究中,通过采用一种极其简单、低成本和自发的策略,将由内在(晶粒尺寸与界面)和外在(薄膜厚度与褶皱)微结构组成的拓扑梯度结构引入到金属薄膜基应变传感器中。当拓扑梯度率为 4.5 时,由于拓扑梯度结构诱导的金属薄膜的多阶段断裂行为,使得该传感器表现出超宽可拉伸性(100%)的同时保持 1.9×10^6 的高灵敏度。为了较好的预测应变传感器的电阻响应,我们建立了两个不需要任何拟合参数的解析模型。另外,通过调控薄膜沉积功率在薄膜与基体之间形成了梯度混合界面以提高界面之间的粘着强度,使得该传感器具有优异的循环稳定性。实验证明,我们的应变传感器在人类活动的全方位监测中具有良好的实用性。值得注意的是,我们的策略不仅限于特定的金属和柔性基体的组合,为设计和制造下一代基于金属薄膜的可拉伸应变传感开辟了新的途径。

D17-41

耳内柔性三维附壁螺旋形神经电子器件设计与应用

王宙恒^{1,2}, 马寅佳^{1,2}, 冯雪*^{1,2}

1. 清华大学柔性电子技术实验室
2. 清华大学航天航空学院

精准、实时连续获取脑电信号(EEG)在人机混合智能、临床脑疾病诊治等领域具有重要的意义。然而,颅骨的存在影响了 EEG 的获取,外耳道的腔道有望削弱颅骨对 EEG 的衰减作用,且所受运动干扰低,可更加有效的记录颞叶、顶叶及枕叶等脑区的神经活动。

外耳道内部蜿蜒曲折的几何形貌及因人而异的特点,对力学、材料、界面及电子器件的设计提出极高的挑战。本报告将介绍基于形状记忆聚合物和平面微纳加工制备技术的耳内柔性三维附壁螺旋形神经电子器件设计与应用。该器件以小螺旋的构型深入外耳道,在电热驱动下膨胀并变形为预设大螺旋构型,受到耳道内壁的约束后自适应地贴合于耳道内表面。其模量可调节的特性平衡了外耳道的生理敏感同信号采集所需界面稳定的矛盾,形态可重构的特性解决了传统支撑物量身定制的难题,同时其中空的结构不影响受试者与外界的沟通与交流,为开发适用于三维复杂表面/结构的柔性电子器件提供了崭新的思路。基于该器件受试者成功实现了基于稳态视觉诱发电位和鸡尾酒会效应的视觉及听觉脑机接口(BCI)研究,验证了器件在 EEG-BCI 中的独特优势,提升了 BCI 的易用性与泛用性,为揭示自然场景下听觉注意机制带来重要的启示。

D17-42

基于 PEGDA/HFIPA/IL 离子凝胶的甲基膦酸二甲酯传感器:从材料到器件应用

苑苑彬, 刘卫华*, 李昕, 韩传余, 胡龙

西安交通大学

引言:离子凝胶(Ion-Gel)材料得益于其强表面极性、丰富的空间网状结构和便捷的制备工艺,在面向气体检测领域具有巨大潜力。实验中我们研发了一种由离子液体(Ionic Liquid, IL) 1-乙基-3-甲基咪唑啉双(三氟甲基磺酰)亚胺(EMIM-TFSI)、聚合物聚乙二醇二丙烯酸酯(PEDGA, MW~250)、光引发剂 2-羟基-2-甲基丙酮(HOMPP)和甲基膦酸二甲酯(DMMP)选择性基团分子六氟异丙醇苯胺(HFIPA)共聚合的 Ion-Gel DMMP 敏感材料。DMMP 是一种有机磷化合物,对生物健康具有潜在危害,且经常被用于化学战剂沙林的模拟剂。通过对比实验,得出配方为 0.2g HFIPA, 0.2mL EMIM-TFSI, 0.8mL PEDGA 的最优化 DMMP 响应材料配比。进一步基于上述 PEGDA/HFIPA/IL 离子凝胶,开发了其在声表面波器件(SAW)、柔性电阻/电容和场效应器件(FET)制备工艺,验证了其在不同类型传感器上的应用潜能。

(1) 基于离子凝胶的 SAW 型 DMMP 传感器及其应用

研究开发了一种基于离子凝胶的 SAW 型 DMMP 传感器制备工艺。首先 SAW 器件用氧等离子体处理提高亲水性。然后将 Ion-Gel 前驱体溶液滴入敏感区域。将经过疏水处理的载玻片覆盖在前驱体溶液的液

滴上。由于毛细力的作用，在两基材之间的空隙中形成液体膜。通过紫外光照射固化液体膜，随后去除石英载片。由于离子凝胶与亲水性衬底的附着力较强，在 SAW 器件上形成了一层薄膜。

我们为上述 SAW 传感器自主开发了相位检测电路。原理如下：现场可编程门阵列（FPGA）控制直接数字合成器（DDS）产生 152MHz 信号。然后将差分相位信号作为传感信号，通过鉴相器将其转换为电压信号。最后，用 FPGA 配置模数转换器采集输出电压信号并记录到计算机中。

结果表明，基于离子凝胶的 SAW 型 DMMP 气体传感器可对最低为 0.2 ppm DMMP 给出 10.8mV 响应，对 20ppm DMMP 的响应/恢复时间为 28/53s。

（2）基于离子凝胶的柔性 DMMP 传感器及其应用

离子凝胶材料充分兼容柔性衬底，因此在应用于柔性可穿戴 DMMP 传感器时具有巨大潜力。器件在蒸镀有叉指电极的聚萘二甲酸乙二醇酯（PEN）衬底上制备，Ion-Gel 前驱体溶液旋涂在衬底上，随后在金属掩膜下，通过紫外光照固化。用去离子水漂洗未曝光区域后，图案化的 Ion-Gel 气敏膜成功完成制备。

由于离子凝胶的双电层，上述在 PEN 叉指电极上制备的柔性 DMMP 传感器可以在电容和电阻两个模式下工作。改变工作频率对传感器进行了测试，结果表明，在低浓度区间工作于电阻模式，传感器灵敏度的一致性保持较好。高浓度区间，电阻模式下传感器的灵敏度会快速进入非线性区，而电容模式仍可以保持较好的线性度。传感器表现出的检测下限为 0.1ppm DMMP，响应时间~30s。

为了进一步开发基于离子凝胶的柔性 DMMP 传感器在实际应用中的可行性，我们部署了一个自主设计的柔性 PCB 前端，用于可穿戴的 DMMP 检测。当环境 DMMP 浓度超过阈值时，PCB 上的 LED 被点亮，指示危险报警信号。

（3）基于离子凝胶的双栅 SWCNT-FET DMMP 传感器

场效应管型（FET）气体传感器通过栅极控制提供可调灵敏度，这在差异化气体传感器阵列的应用中具有显著优势。我们开发了一种双栅碳纳米管场效应管 DMMP 传感器，以 Ti/Au 为底栅（BG）、HfO₂ 底介电层、Ti/Au 源/漏极以及离子凝胶顶部介电层。通过改变栅极偏置，BG 调节 SWCNTs 沟道的费米能级，而顶部 Ion-Gel 栅极（IG）控制气体吸附过程中的电荷转移和分子极性取向，从而实现灵敏度可调的 DMMP 传感。

测试首先将 V_{BG} 设置为 -2V，在不同的 V_{IG} 下测试传感特性。结果表明，传感器在 $V_{IG} = -3V$ 时显示出最大灵敏度。在 25ppm DMMP 氛围下， $V_{IG} = -3V$ 下工作的器件响应为 ~3.7 μA ，表现出比 $V_{IG} = 1V$ 高约 1.5 倍的响应。这是因为 V_{IG} 可以改变离子凝胶介质中由于气体吸附而转移的电荷的迁移，从而调节传感器的灵敏度。随后，将 V_{IG} 固定在 -1V，分析了不同 V_{BG} 偏置下的传感特性。结果表明，在 $V_{BG} = 0V$ 和 2V 时，传感器的响应受到明显抑制， $V_{BG} = -2V$ 时传感器响应最大。这种衰减趋势与 V_{BG} 调节 SWCNTs 费米能级的作用有关，从而影响了顶部栅极吸附气体对沟道的调制能力。

总结：本摘要介绍了一种用于 DMMP 气体检测的 Ion-Gel，所述的 Ion-Gel 由离子液体、聚合物单体、光引发剂和 DMMP 敏感基团共聚合制备。随后，我们系统性地介绍了这种 Ion-Gel 在 SAW 型、柔性 FET 型传感器上的应用方法。几种传感器均对 DMMP 气体表现出优异的灵敏度。这一工作对新型气敏材料研发及其实际应用可以产生推动作用。

D17-43

基于二维范德华异质结构的高灵敏纳米机电电压阻压力传感单元设计

曾海鸥，王路达*

北京大学

微机电系统（MEMS）微压传感器在消费电子、工业监控和生物医学领域有着广泛的应用。然而，随着近年来下一代便携式和可穿戴设备的蓬勃发展，为了打破小型化过程中灵敏度和非线性之间的权衡，现有的压力传感器设计面临着巨大的挑战。在这里，我们报道了一种用于微压检测的三明治状石墨烯/h-BN/石墨烯异质结构传感元件。此设计通过 h-BN 实现底部石墨烯结构层和顶部石墨烯压阻层的绝缘，将压力-应变转换过程和应变-电信号传感过程解耦。利用有限元模拟揭示了异质结构尺寸、层数和预应力对机械性能的影响，并提出了压敏电阻的设计原则和异质结构的图案化策略。此二维材料异质结构表现出超高的单位面积灵敏度，比现有的石墨烯基和硅基传感器高出 2~5 个数量级，并且非线性度显著降低；表明二维材

料异质结构传感单元具有打破超高灵敏压力传感器小型化限制的的巨大潜力。

D17-44

微通孔阵列 CuO/ZnO 纳米薄膜气体传感器及其性能研究

周新宇, 张迅, 王如志*

北京工业大学

玻璃通孔技术 (Through Glass Via, TGV) 是穿过玻璃基板的垂直电气互连技术, 被认为是最可能代替硅通孔的下一代三维集成关键技术, 在新一代气体传感器领域有着巨大的发展潜力。本文利用反应溅射法在 TGV 微通孔阵列中沉积了 CuO/ZnO 薄膜, 研究了反应溅射 CuO 薄膜中 Ar:O₂ 比值变化以及在孔内 CuO 薄膜与 ZnO 薄膜膜厚的比值对乙醇、氢气、二氧化氮等气体传感灵敏度及响应 (恢复) 时间的影响。同时, 也探索了气体曝光面积以及 CuO/ZnO 双层纳米薄膜构建的 p-n 异质结对气体传感性能的影响。我们的研究利用微通孔阵列结构制作微纳气体传感器具有结构紧凑、方便集成的特点, 将为 TGV 技术在气体传感器领域的应用提出了新的发展思路, 将为航空、航天、环境检测及危险环境预警等领域提供了新的气体检测解决方案。

D17-45

可图形化的高性能碳基纳米沟道半导体气体传感器研究

吴海洋^{*1}, 余宁梅¹, 刘卫华²

1. 西安理工大学

2. 西安交通大学

可图形化的敏感沟道对碳基气体传感器的微型化和可集成化具有重要意义。实验中我们围绕单层石墨烯和半导体性单壁碳纳米管敏感材料, 研发了几种改善其气敏性能的方法。主要工作和结论包括:

(1) 紫外臭氧 (UVO) 原位氧化的 CVD 石墨烯气体传感器

首先通过化学气相沉积 (CVD) 生长出单层石墨烯, 利用湿法转移和紫外光刻获得微米级沟道, 然后将器件放置在 UVO 处理腔中, 通过 UVO 原位处理, 在石墨烯表面引入氧官能团。该方法易操作、成本低, 且适用于大规模石墨烯传感器的制备。通过测试浓度范围为 50 至 500 ppm 的氨气 (NH₃), 评估了所提出的传感器气敏性能。实验结果表明, 随着 UVO 处理时间从 0 增加到 4 分钟, 在 500 ppm NH₃ 测试中, 气敏响应从 8.93% 线性增加到 43.11%, 而暴露时间达到 8 分钟后, 响应降低到 28.15%。这可能是因为短期 UVO 曝露期间, 对石墨烯的表面氧化作用占主导地位, 而在曝露时间增加后, UVO 的破坏性蚀刻占主导地位。此外, UVO 处理后的气体传感器的响应速度远快于原始石墨烯, 而在恢复过程中并未观察到明显变化。本文所提出的方法可能为其他二维材料的表面改性和气体传感性能的改善提供参考价值。

(2) p-G/G 复合沟道气体传感器

在保持高载流子迁移率的同时, 如何增加有效气体吸附位点是石墨烯气体传感器研发中面临的主要挑战之一。本文进一步提出了双层堆叠结构的复合薄膜沟道: 利用氧等离子体处理的石墨烯 (p-G) 作为上层气体分子 “抓手”, 本征石墨烯 (G) 作为下层载流子快速输运通道, 通过两次湿法转移和一次光刻, 获得了微米级图形化的 p-G/G 堆叠结构复合敏感膜。实验结果表明, p-G/G 传感器具有与本征石墨烯传感器可比拟的高迁移率。室温下, p-G/G 传感器对 1000 ppm NH₃ 的响应是本征石墨烯传感器的 4 倍、是 p-G 传感器的 2 倍。本文所研发的气体吸附位点生成方法与标准光刻工艺相兼容, 有利于传感器的小型化和集成化。

(3) 基于 SWCNTs-HFIPPH 的 DMMP 气体传感器

研究了一种基于芳基六氟异丙醇 (HFIPPH) 原位修饰单壁碳纳米管 (SWCNTs) 敏感膜的场效应管型 (FET) 气体传感器。首先利用静电自组装在 FET 电极衬底上形成厚度仅为 4 nm 的 SWCNTs 薄膜, 通过标准光刻工艺得到微米级特征尺寸的敏感沟道, 并通过重氮反应将 HFIPPH 基团原位接枝到 SWCNTs 表面。通过沙林模拟剂—甲基膦酸二甲酯 (DMMP) 测试和评估了传感器的气敏性能。实验结果表明, 传感器对 1 ppm DMMP 的响应为 18.2%, 响应时间约为 10 s。进一步利用 SWCNTs-HFIPPH 气体传感器和购买的商用乙醇气体传感器, 分别对 DMMP 和乙醇双组分混合气进行识别, 结果表明本文研制的气体传感器对

DMMP 分类正确率为 94.11%。

综上，本工作介绍了三种可图形化的碳基敏感沟道功能化方法，在改善传感器气敏性能的同时，使得沟道可缩小至微米级特征尺寸，为研发小型化、便携式气体传感器奠定了重要的基础。

D17-46

硅纳米线场效应生物传感器对复杂样本中褪黑素的检测

欧天浪，魏峰*

北京有色金属研究总院

硅纳米线具有比表面积大、生物兼容性好的特点。硅纳米线场效应管已广泛应用于生物分子的高灵敏检测。对于复杂样本中极低浓度的目标分子实现高灵敏检测仍具有挑战性。本方案采用氧等离子体处理硅纳米线，使其表面羟基化（-OH），通过搭载微流控通道以及与器件匹配的夹具，利用金丝键合将器件与外部电路形成测试系统。使用蠕动泵将 APTES 溶液缓慢输送到硅纳米线场效应管的传感区域进行硅烷化处理，利用硅烷化处理后-NH₂ 封闭的末端，结合以-COOH 修饰的核酸适配体探针，形成具有特定分子捕获的功能层。适配体是一种人工合成的功能核酸，具有热稳定性好，特异性强的优点，当适配体与靶标分子结合时，发生构象变化，从而影响硅纳米线场效应管沟道载流子的变化进而影响电流的响应。通过此种简单的硅纳米线表面处理方法，成功检测了极低浓度的褪黑素，其检测限为 15 fg/ml，并对不同时刻采集的复杂样本（如血清、唾液）中褪黑素的检测，结果表明不同时刻采集的样本具有良好的区分度。

D17-47 (Invited)

叠层共烧逾渗型界面层陶瓷电容器的制备与高比容特性

魏晓勇*

西安交通大学

大容量电容器（多层陶瓷电容器、薄膜电容器、电解电容器、超级电容器）在信息通信、医疗健康、新能源汽车以及国防领域扮演着重要的角色。然而，上述电容器仍然难以满足日益增长的高容量、小体积、高可靠、耐严苛条件等综合需求。本工作旨在借用超级电容器大的电极比表面积的思路，将界面层放置在 3-3 复合的两相逾渗互联的半导体陶瓷之间，突破传统表面层界面层电容器容量不够的技术瓶颈，形成具有更高比容安全可靠的逾渗型界面层电容器。采用轧膜工艺制备了单层 CaMnO₃ (CMO) 和 Ni_{1-x}Li_xO (NLO_x, x=0.01,0.03,0.05) 陶瓷、NLO_x/CMO/NLO_x 和 NLO_x/MC/CMO/MC/NLO_x (MC 是不同质量比混合的复相陶瓷) 叠层陶瓷。分析表明，单层 CaMnO₃ (CMO) 和 Ni_{1-x}Li_xO 陶瓷均展现 >0.1 S/cm 的电导率，叠层共烧的 NLO_x/CMO/NLO_x 陶瓷样品的 CMO 层和 NLO_x 层平整连续，接触紧密，无明显元素扩散现象。界面比容量为 ~4.4 uF/cm² (0.05 Hz)，绝缘电阻率提高 6 个数量级。在 CMO 层和 NLO_x 层增加了 MC 逾渗型复相陶瓷以增加界面层比表面积，比容量提高至 ~41.2 uF/cm² (0.05 Hz)，在 10⁴ Hz 频率下仍保持 >0.4 uF/cm²，耐受电压可达到 ~5 V。通过阻抗谱分析、XRD、XPS、TEM、拉曼光谱、I-V 曲线测试、模拟计算和微区界面电阻测试实验可知，其 CMO 层和 NLO_x 层高比容界面主要来源于锰离子的积累，形成了新的高阻层，阻碍了载流子的长程迁移。

关键字：液栅石墨烯晶体管，传感器，健康监测，便携式检测

D17-48 (Invited)

LTCC 射频器件用低介低损耗微波介质材料研究

胥世我^{*1,3}，雷文²，党明召^{1,3}，陈涛^{1,3}

1. 广东风华高新科技股份有限公司

2. 华中科技大学

3. 新型电子元器件关键材料及工艺国家重点实验室

全球信息化迈进 5G 时代，我国 5G 发展全球领跑，但 5G 用的核心部件—射频器件仍是 35 项“卡脖子”技术之一，尤其是 LTCC 射频器件被日本 Murata、德国 Bosch 等国外企业垄断，占据了市场近 80% 份额及 85% 以上行业利润，严重影响我国 5G 产业安全。我国应用于 LTCC 射频器件的低介低损耗微波介质材料

目前处于研究与应用示范阶段，因介电常数高、损耗大、介温特性弱等问题而严重依赖进口，因此，低介低损耗微波介质材料的研究及工程化应用，是 LTCC 射频器件国产替代的关键，是我国通信产业中关注的重点及积极前行的方向之一。

项目面向 5G 应用需求，重点研究具有工程化优势的低介低损耗微波介质材料体系、生瓷带流延制备、高电导率银电极浆料及共烧匹配特、介质材料在射频器件中的应用工艺及材料与器件量产工艺等关键工程化技术。项目形成了自主可控的科技成果，并在 5G 用 LTCC 滤波器上实现了工程化应用，逐步构建具有自主知识产权的“材料—器件—生产—应用”产业生态链，实现低介低损耗微波介质材料及 LTCC 射频器件国产替代，有效缓解我国 5G 产业链“卡脖子”风险，助力我国电子信息产业安全发展。

为提升 LTCC 射频器件综合性能，项目联合国内 LTCC 材料及器件上中下游产业链的龙头企业、知名院所进行多维度创新。重点通过较全面深入的知识产权分析以推动专利群布局，形成材料-设计-量产-应用一体化的协同开发经验在行业内示范推广，为我国全链条协同创新提供借鉴。

D17-49 (Invited)

高温加速度传感器中压电材料振动模式的应用

郇正利*

山东利恩斯智能科技有限公司

耐高温压电材料是解决高温加速度传感器的关键，其优异的压电性能和高电阻率是压电材料在高温等恶劣环境下稳定运行的先决条件。压电单晶和铋层状无铅压电陶瓷具有高居里温度、低损耗、高电阻率以及良好的温度稳定性等特性，是高温加速度传感器敏感元件的主要材料。本报告将从压电材料的不同振动模式，搭配传感器的不同结构去阐述如何解决高温加速度传感器的灵敏度、量程以及温漂上的难题，使高温加速度传感器能够在高温下长期稳定运行，填补国内高温加速度传感器在 600℃及更高温度使用范围的空白。

D17-50 (Invited)

高温压电陶瓷材料及其传感应用

陈渝*

成都大学

随着无线传感器网络的发展，高温环境中的传感器能量自供给问题日益成为航空发动机、重型燃气轮机、核反应堆等国防重大装备关键部位自检测、传感与通讯亟需解决的科学技术问题。本报告综述了高居里温度铋层状结构铁电陶瓷(BLSF)和高温压电器件的研究进展，包括 $\text{SrBi}_{4.5}\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 、 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 、 $\text{CaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ 、 $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$ 、 $\text{CaBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ 等材料体系的化学掺杂改性和晶粒取向技术；高温压电探测器、传感器、换能器和驱动器等器件的性能特点，以及 482℃高温压电加速度的结构设计、测试校准及其在重大技术装备振动测试和故障预警等方面的应用等。

D17-51 (Invited)

集成电路用高纯溅射靶材制备技术及发展方向

丁照崇，何金江*

有研亿金新材料有限公司

高纯溅射靶材是集成电路用关键基础材料，对实现集成电路产业链、供应链自主可控，推动集成电路产业高质量发展具有基础性价值。本文针对集成电路用高纯铝合金、钛、铜及铜合金、钽、钴、镍合金、钨及钨合金等核心靶材，阐述了高纯原料提纯及控制、高致密低缺陷铸锭/烧结坯成形、大面积靶坯晶粒及取向高均匀调控、靶材与背板高可靠异质焊接、靶材局部粗化增强吸附控制等靶材关键制备技术，着眼集成电路领域 2030 年发展目标，提出了集成电路用高纯溅射靶材关键技术发展方向。

D17-52(Invited)

集成电路溅射用高纯钽靶在轧制过程中织构演化的晶体塑性模拟研究

史佳庆¹，张淞²，谭成文²，于晓东²，聂志华²

1. 有研工程技术研究院有限公司
2. 北京理工大学材料科学与工程学院

在集成电路溅射用高纯钼靶的轧制加工过程中,不均匀的塑性变形会使钼靶坯中形成沿厚度方向的织构梯度,进而对靶坯的应用性能产生不良影响,最终导致生产芯片的可靠性下降。为了进一步研究周向轧制过程中高纯钼靶坯织构演化的细节,实现对钼靶坯内织构分布的精确调控,本研究采用晶体塑性有限元方法(crystal plasticity finite element method, CPFEM),并结合 EBSD 表征技术,研究了周向轧制过程中,钼靶坯沿厚度方向的织构演化规律。研究表明可通过调整轧制工艺,平衡轧坯所受平面应变状态和表面剪切应变状态对变形贡献的大小,进而调节钼靶坯的表层和中心层的织构强度,达到减小织构梯度、提高织构均匀性的目的,进而优化钼靶的溅射性能。

D17-53(Invited)

高算力芯片基板材料的发展与挑战

丁善军

中国科学院微电子研究所封装中心

基板是 Chiplet 的核心载体。高端数字电路的算力驱动要求基板具有“大尺寸、细线路、高叠层”三个核心特征。本报告将分析大尺寸基板对材料、结构、工艺以及设计方法带来的影响以及解决途径。重点关注了大尺寸基板的翘曲分析方法,并对玻璃基板材料的特点及其在缓解翘曲方面的作用进行分析与讨论,同时也关注精细线路的异质材料界面粘附的研究进展。

关键字: 高算力, 芯片基板, 翘曲, 精细线路

D17-54(Invited)

面向人工智能应用的碳基有机复合光电器件

李宇涛

北京理工大学集成电路与电子学院

随着“后摩尔时代”时代的到来,纳电子科学与技术研究的重要性日益凸显,开发碳基纳电子技术对未来集成电路乃至整个信息产业的发展都至关重要。面向人工智能应用的碳基有机复合光电器件是纳电子技术领域的重要研究方向之一。算法和器件的可调特性是实现更高效人工智能应用的重大挑战,相比较于人工智能算法成熟的可调性,开发特性可调的器件还是一个尚未攻克的难题。围绕着传统器件结构/功能单一、缺乏可调节性等难题,本次报告提出以碳纳米管-功能化有机光电材料为基础,构筑碳基有机复合微纳光电器件,并通过人工手段对其光电性能进行调控,充分发挥碳纳米管在提高有机材料光电性能方面的独特优势。一方面,创新性地构筑基于碳纳米管与二维钙钛矿复合的光突触器件,并通过光照增强二维钙钛矿材料的动态离子迁移速率,从而实现光突触的可重构特性;另一方面,受视网膜结构启发,通过碳纳米管与细菌视紫红质复合,利用碳纳米管的高载流子迁移率,实现了对器件光电流持续时间的调节,以捕捉动态视觉信号。最后将这些具备可调特性的碳基有机复合光电器件与人工智能算法有效结合,以扩展其应用广度和深度,为未来人工智能硬件领域的发展打下基础。

D17-55(Invited)

Flexible and wearable epidermal ECG patch for continuous ECG monitoring

Anneng Yang*, Ge Ren, Jiale Yang, Guangmei Hu, Xuanning Wang

Kunming University of Science and Technology

The wearable devices with thin, soft, and deformable merits provide a desired pathway to record various electrophysiological signals for medical diagnosis and healthcare monitoring. Among these wearable systems, epidermal electrocardiogram (ECG) monitoring systems are the most essential and commonly used tool for cardiac-related disease diagnosis and alarm. However, the existing ECG monitoring systems need to use multiple

long wires and the electrodes suffer from poor adhesion, stretchability and biocompatibility, which limit their wearability and conformability in practical applications. Herein, we employed two approaches to implement electrocardiogram measurement. On the one hand, we used ultra-flexible organic electrochemical transistor (OECT) arrays for wearable ECG mapping on the skin surface above a human heart. On the other hand, in order to decrease the interface impedance between the skin and electrode, a stretchable, highly adhesive and bio-compliant flexible electrode was developed. Based on the merits of the electrode, a wearable ECG monitoring system is developed by integrating the electrode with a custom-made and portable signal acquisition system, realizing long-term, imperceptible and high-quality ECG monitoring. While QRS complexes of ECG signals at different recording distances and directions relative to the heart are obtained. The OECT arrays and electrodes that can conveniently monitor ECG signals in the heart region may find niche applications in wearable electronics and healthcare products in the future. Furthermore, the ECG signals are successfully analyzed by the devices before and after exercise, indicating potential applications in some sports training and fitness scenarios.

D17-56

基于硅柱阵列的超灵敏太赫兹超材料生物传感器

门阔¹, 赵鸿滨³, 魏峰², 魏千惠², 毛昌辉³, 屠海令^{*3}

1. 有研工程技术研究院有限公司
2. 有研（广东）新材料技术研究院
3. 中国有研科技集团有限公司

太赫兹 (THz) 技术作为一种全新的无创、无标记光谱技术, 在生物分子检测领域备受关注, 尤其是在临床体外检测 (POCT) 中, 具有重要价值。近年来, 科研人员对超材料的研究日益增加, 由于超材料具有设计性极强的周期性结构, 可以操控电磁波的传播性质, 因此可以实现对局部电磁场的增强。因此, 超材料能够探测周围电磁环境的微妙变化, 从而提高对表面极微量物质的灵敏度。本工作中, 我们设计并制备了一种基于硅柱阵列的超灵敏太赫兹超材料生物传感器, 并用于检测典型的肿瘤标志物。硅柱阵列结构是在 BF33 玻璃上通过键合和蚀刻工艺制作完成的。基于硅柱阵列的介电超材料可用作生物传感器, 具有较低的损耗特性, 在 0.7~0.9 THz 频段内, 品质因子 Q 最高可达 27。该生物传感器对于两种肿瘤标志物的检测限分别为 1 mg/mL (CA125) 和 0.1 mg/mL (HER2)。浓度对数的线性响应范围在 1 mg/mL~10 µg/mL。这些结果表明, 这种生物传感器具有高灵敏度的肿瘤标志物检测能力, 在癌症诊断中具有显著的潜在应用价值。

D17-57 (Invited)

超快速(5 秒)界面纳米粒子宏观单层自组装及其柔性生物传感应用

黄又举*

杭州师范大学

由于难以克服的动力学和热力学吸附势垒, 传统液-液界面自组装往往呈现耗时、重复性差、无法大面积制备等不足, 并导致纳米粒子界面自组装尚未用于纳米薄膜工程化技术开发, 进而限制其在传感、显示、光电器件等领域的功能应用。本报告在纳米粒子组装体系中引入具有超低表面能的全氟分子, 赋予纳米粒子超高接触角, 将动力学和热力学吸附势垒降低至极限, 可以在 5 秒内实现超快速、宏观大面积、二维单层膜组装结构的构建 (Science Advances 2021, 7, eabk2852)。而且, 组装面积可满足工程技术成本要求 (>4 英寸), 达工程应用级别 (4.3 英寸), 粒子成膜利用率高达 97.5%。与传统组装策略不同, 这种组装技术可普适到多种纳米及微米粒子的快速大面积界面自组装。不同形貌、不同种类及表面性质的纳米及微米尺度粒子均可通过这种超快速界面组装技术, 获得宏观大面积二维组装结构。最后, 通过集成纳米粒子二维膜“Plasmonic”和高分子基底“Flexible”功能, 设计了柔性等离子激元生物传感器, 并探索了在人体健康监测领域的应用 (ACS Nano 2021, 15, 18822; Chem. Soc. Rev., 2023, 2992)。

D17-58(Invited)

卫星用高纯氧化铝基板的应用技术研究

何端鹏*

中国空间技术研究院

高纯氧化铝陶瓷具有加工技术成熟、耐热冲击和电绝缘性能好以及与金属附着性良好等优点，作为基板材料，被广泛应用于星载微波信号传输通道、有源器件安装载体以及功率芯片的散热通道等电子载荷单机中。然而，国内生产的高纯氧化铝存在电性能离散大、基板致密性不足以及内部缺陷多等问题，其性能水平将直接影响单机在轨的可靠性。本文通过全面分析星载产品用高纯氧化铝基板应用需求，研究建立了星载微波电路用高纯氧化铝基板的批产性能稳定性、工艺适用性和应用可靠性指标体系，形成验证试验项目，利用电路工艺件试验和组件产品环境适应性考核等试验验证手段，构建了陶瓷基板类材料的应用验证方法。

D17-59(Invited)

导电复合材料在电能传输与印刷电子中的应用

田亮

西安交通大学前沿院

高性能导电复合材料是实现可再生能源利用与高压输电、柔性印刷电子关键器件、脑机接口等关键领域的重要组成部分。高性能导电复合材料通常需要同时满足高导电性与高机械性能等关键性能。作者采用新型的离心雾化技术方法和仪器设备制备了微米级别、极易反应的纯钙金属粉末，以此研发了一种新型的轻质、高强度、高导电性铝基纯钙复合材料，相比于工业常用同类铝基电缆材料，该材料的密度减轻了 28%，强度提高了 58%，导电性提高了 28%，节省了 22% 电能输送损耗，有利于提升导电线缆材料服役的可靠性和高压输电电源的利用效率。作者同时开发了一种新型的金属/二维材料导电复合油墨材料，该导电复合油墨材料印刷后柔性电路的导电性可达该纯金属导电性的 1/3 左右，比同种类导电银浆经过相同印刷烧结工艺后的电导率提升 20%，其疲劳循环使用寿命比同种类导电银浆提升 55%。

关键字：导电复合材料，力电特性，印刷电子，导电油墨

D17-59

AlN 薄膜体波换能器的超声信号增强机制研究

王凤起，廖成*

中物院成都科学技术发展中心

极端环境下的结构连接安全是重要装备和设施可靠运行的关键因素，也是业界的痛点和难点。薄膜体波换能器依靠压电材料进行超声信号的收发，利用声时差原理可快速、精准检测螺栓连接的预紧力。纤锌矿氮化铝（w-AlN）具有声速高、品质因数大、化学稳定性强、耐高温等优点，可耐受极端恶劣环境，但是 AlN 薄膜体波换能器超声信号的收发性能较弱。本文通过结构优化设计来增强 AlN 薄膜体波换能器的超声信号，并揭露回波信号增强的机制。首先，利用有限元方法进行结构设计，构建了不同压电层（AlN）厚度、电极层（Mo）厚度、电极直径的体波换能器模型，仿真了声波信号在 M8 螺栓模型内部的传播途径和方式，并优化其回波信号。然后，将设计的结构进行实验验证，利用磁控溅射方法直接在 M8 螺栓端面原位生长 AlN 薄膜和 Mo 电极集成体波换能器，研究了 AlN 薄膜体波换能器的微结构和回波信号的变化，实验结果与有限元仿真结果表现一致：随着压电层厚度的增加，AlN 的压电性能趋于稳定，回波信号逐渐增强；随着电极层厚度的增加，器件接收电荷的能力增强，回波信号最大提升了约 10 倍；电极直径为 2-4 mm 时信号传播途径全部集中在螺杆内部，超声波的扩散、散射、吸收等衰减较少，回波信号最强。结合有限元结构仿真和实验优化探索，最终制备出了具有较强收发信号能力的 AlN 薄膜体波换能器，可对恶劣环境下的螺栓预紧力进行稳定、有效的监测。

D17-60

全纤维驱动器的编程设计及软体机器人传感应用

张雨凡，熊佳庆*

东华大学

随着智能传感技术飞速发展，各类传感功能器件在前沿科学和商业领域受到广泛关注。为开拓多元的功能场景，现有传感器件往往以模块的形式组装而成，器件设计繁杂且牺牲了操作和传感灵活性，无法满足先进智能器件的多功能多场景应用需求。在操纵过程中同步实现信息感知/传感是解决这一问题的关键，比如开发一种可响应复杂环境，集行走、操纵和感知为一体的驱动器，实现具有多重刺激驱动和同步感知能力的软体机器人。我们利用纤维结构-力学编程技术，实现纤维形貌和取向排列等精准设计，结合纤维材料的大面积高效自能量传感特征，提出了机械致动引起的自能量电反馈传感策略，开发了一种机械-电学耦合式全纤维基软体机器人，并实现其自主环境驱动和智能信息感知（接触材料类型、温度和湿度）等功能和应用，突破了智能传感器感知和操作难以灵活同步化的技术难题，展现了自供电软体机器人与复杂环境信息交互的通用策略。

D17-61

Influence of Vacuum Annealing on the Palladium/Titanium Hydrogen-absorbing Materials

Huating Wu^{1,2}, Yu hua Xiong^{*1,2,3}, Zhisheng Shi^{1,2,3}

1. State key Laboratory of Advanced Materials for Smart Sensing, GRINM Group Co., Ltd.
2. GRIMAT Engineering Institute Co., Ltd
3. General Research Institute for Nonferrous Metals

Residual hydrogen will cause the performance of gallium arsenide (GaAs) devices to decline over time, since the use of Pt or Pd conductor layers, hydrogen getters can be critical here. However, traditional non-evaporative getters (NEG) usually require high temperature activation before use, which is incompatible with GaAs devices because of the presence of low-temperature solder inside. In order to solve this problem, a new double-layer Pd/Ti hydrogen getter was developed. In this paper, the microstructure of Pd film was studied by SEM and the XRD was used to analyze the crystal structure of the sample before and after hydrogen absorption. The results show that the surface Pd film is densely packed, and the face-centered cubic TiH_2 phase appears after the sample absorbs hydrogen. The XPS was used to analyze the element valence states of the sample before and after vacuum annealing. The sample without annealing treatment has a higher oxygen content at the interface between the Pd film and the Ti foil, which is not conducive to hydrogen absorption. While after annealing treatment, most of the titanium was in the metallic state, its hydrogen absorption activity was restored. This is confirmed in the results of the hydrogen absorption performance test by Sievert's type apparatus. In addition, the hydrogen absorption of the annealed Pd/Ti getter is still as high as $2.32 \text{ mbar}\cdot\text{L}/\text{cm}^2$ after being exposed to the atmosphere for 12 h, which can be directly applied to a hydrogen-sensitive vacuum device without additional activation.

D17-62

基于 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ 的室温超高选择性气敏忆阻器及其铁电阻开关

谭莉萍，胡雪峰*

合肥工业大学

快速的工业化和城市化进程导致大气污染大幅增加，给人类带来了不可避免的挑战，因此设计一种监测有害气体并记录气体泄漏时间和设备运行温度变化的传感系统变得至关重要。得益于铁电极化氧化物 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT) 中 Bi 原子对 H_2S 氧化反应的催化敏化作用、带隙可调以及羟基功能化表面激活的 NO_2 响应性，我们利用硅基半导体工艺制备了具有单个超薄 SBT 敏感层的气敏忆阻器。该器件集成了室温 (RT) 气体传感和铁电阻开关功能，具有稳健的保留时间和双极性铁电阻开关行为，在感知气体的同时对气体浓度和操作温度等进行信息存储。在高电阻状态（低电阻状态）下实现了对 H_2S (NO_2) 的唯一选择性，气体检测限分别为 85 ppb (H_2S) 和 1 ppm (NO_2)，均低于工业操作环境安全的最大允许浓度，具有快速响应（17 秒）和恢复（52 秒）时间的同时，对 NO_2 具有超高的相应灵敏度 ($S=500\%$)，且首次实现了超低能耗 (12.5 nJ)。最后，通过电学测量成功实现了气体触发电阻开关的温度记忆，及基于 NO_2 气体实现的铁电组重置 (RESET) 过程，并在弱电流下通过模拟类晶闸管开关实现了 20~100 ppm H_2S 触发设置 (SET)

过程。铁电非易失性存储与气体传感优势的完美结合，为优化传统气体传感器提供了一个直接范例。

D17-63

新型气溶胶喷射电子打印平台的开发和应用研究

黄冰雪*

西华大学

柔性应变传感器件近年来在人民生活和社会生产中发挥了重要的作用，其日渐复杂的应用工况对传感器制备成型工艺提出了严峻的挑战。气溶胶喷射 3D 打印技术因其优异的打印精度、材料和衬底形貌兼容性等优势在柔性应变传感器领域具备了广阔的应用前景。然而，在气溶胶高精度喷印过程中，活性物质不稳定堆积产生的打印缺陷不可避免地损害了喷印线路的电信号传导性能。因此，本文拟通过机器视觉和 AI 辅助缺陷优化策略，优化高精度喷印过程中的打印缺陷，提高打印质量，构建用于高精度气溶胶喷射电子打印技术的机器视觉缺陷检测和 AI 缺陷优化算法。基于所构建的气溶胶喷射智能电子打印平台，开发基于 MXene、碳管和 PETDOT:PSS 等活性导电材料的柔性传感器件，探究界面相互作用对于电信号传导稳定性的影响规律。

墙报

D17-P01

改性 MXene/TiO₂ 修饰织物的制备及其气敏性能研究

袁润，张亚斌*

广西大学资源环境与材料学院

呼出气体中的丙酮通常被用作诊断糖尿病的生物标志物^[1]。开发一种高效可靠的可穿戴丙酮气体传感器，能够实时测量人体呼出气中的丙酮含量变化，从而对人体健康状况预警以及疾病无创诊断是非常有必要的。MXene 因其卓越的性能而对室温气体传感器极具吸引力，易于集成到可穿戴设备中，弥补了传统气体传感器的缺点^[2]。然而，用原始 MXene 制备的气体传感器对丙酮气体的检测通常存在选择性差、灵敏度低等问题^[3]。鉴于 MXene 丰富的可调表面末端和缺陷促进了多种功能化方案，特别是，Ti₃C₂T_x MXene 丰富的 Ti 源促进了 TiO₂ 的可调生长，这也可能引入异质结构和原子缺陷，有利于提高气体传感性能。

在这里，我们提出了一种由 Ti₃C₂T_x MXene 原位生长的 TiO₂ 纳米颗粒混合材料浸涂在棉线上制成的化学电阻性气体传感器，用于室温下的气体传感应用。首先，我们采用 MILD 方法刻蚀 Ti₃AlC₂ MAX 相制备了单层 Ti₃C₂T_x MXene，通过溶液氧化法将单层 Ti₃C₂T_x 纳米片部分氧化成 TiO₂ 纳米颗粒 (Ti₃C₂T_x/TiO₂)。随后采用浸涂法将 Ti₃C₂T_x/TiO₂ 溶液均匀涂覆在聚多巴胺改性的棉线表面。Ti₃C₂T_x/TiO₂ 溶液涂覆的棉线在室温下对 50 ppm 丙酮表现出较高响应 (S%=2.33%)、ppb 级 (200 ppb) 的检测水平，响应速度快，重复性良好。此外，该传感器利用棉线作为电子纺织品的基材，不仅保留了纺织材料的固有特性，如出色的柔韧性、透气性和伸长率，而且还能通过编织、针织或刺绣等方法制造可穿戴纺织品。

参考文献

[1] Turner, Claire, et al. Journal of breath research, 3 (2009): 046004.

[2] Lee, Eunji, et al. ACS applied materials & interfaces, 9 (2017): 37184-37190.

[3] Kim, Seon Joon, et al. ACS nano, 12 (2018): 986-993.

D17-P02

基于仿生机制的柔性可穿戴半导体嗅觉传感器设计与应用

钱星雨，张子颜，吴佳顺，朱政旭，肖光裕，徐佳雯，张红洁，刘诚信，郭小辉，赵雨农*

安徽大学

随着物联网和人工智能应用的不断发展和深化，诸多领域对传感器提出了新的需求，传感器迎来新的机遇，迫切需要发展支撑新一代人工智能的高灵敏度、高可靠性柔性传感器。传统的刚性气体传感器难以

满足智能可穿戴电子领域的需求,器件柔性化是当今气体传感器的一个重要发展方向。本工作以嗅觉神经元为研究灵感,选取纤维作为柔性衬底,以硫化铋纳米带(Bismuth Sulfide Nanobelts, Bi_2S_3)材料敏化石墨烯纳米片(Graphene Nanoplatelets, GNPs)构建复合敏化结构,采用层层组装-浸渍涂覆的工艺构建了无机纤维衬底-偶联剂-复合敏化气敏层的层状结构,纤维衬底比表面积大、疏松多孔、骨架结构丰富的特点,不仅有助于纤维骨架与气敏材料的结合,其特有的圆柱环状主体结构还有助于在有限区域内扩大敏感材料与气体分子的接触面积,促进气敏响应过程中气体分子的吸附和脱附速度。与现有的室温柔性气体传感器相比,该复合纤维柔性气体传感器在保证灵敏度的前提下,有效改善了响应恢复特性,实现了柔性气体传感器对气体的分钟级探测,兼具可拉伸、可弯曲特性,在特定的机械应变状态下仍可保持较好的响应恢复能力。

D17-P03

柔性可穿戴温度-应变双模态传感器的设计与制备

李诗颖, 巫远招, 刘宜伟*, 李润伟

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

传感器作为信息感知的关键元件,是实现“万物互联”的重要基础单元。其中,兼具温度-应变感知功能的柔性双模态传感器具有良好的柔韧性和温度、应变感知能力,在健康监测、智能机器人以及智能汽车等领域发挥着重要的作用。然而,目前柔韧性和高温区间还难以兼顾,以及温度与应变的解耦方法还存在一定的挑战。基于此,本文选择 PDMS/ BaTiO_3 为温度敏感材料,构建电容式温度传感单元;NiCr 为应变敏感材料,构建电阻式应变传感单元。利用中性层结构设计,消除应变对温度的影响,建立温度、应变与电阻的相关方程,实现温度和应变的解耦。该传感器温度工作温度范围为 $0\text{ }^\circ\text{C} \sim 200\text{ }^\circ\text{C}$,灵敏度高达 $-160.90\text{ fF}/^\circ\text{C}$,线性度高达 0.998,分辨率高达 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$;应变的最低检测极限为 $20\text{ }\mu\epsilon$,加载-卸载响应时间分别为 54 ms 和 74 ms,在智能机器人、人机交互等领域展示着良好的应用前景。

D17-P04

面向健康监测与光热治疗的类海胆状结构智能传感材料与器件

肖明月, 陆铭, 万鹏博*

北京化工大学

可穿戴电子传感器在多功能电子皮肤、可穿戴个性化健康监测、智能人机交互、智慧医疗等领域展现出了巨大的潜力。然而,如何实现高灵敏、快速响应、低检测下限、良好的循环稳定性以及优异的传感性能,并集成多功能应用如健康监测、光热治疗等仍是亟待解决的问题。本文介绍了一种受人体皮肤棘突微观结构启发的新型柔性电子传感器,在多功能电子皮肤、个性化健康监测、智能人机交互以及智慧医学诊疗等领域展现出了显著潜力。传感器以聚己二酸丁二醇酯-聚氨酯(PBAPU)弹性体为基底,结合导电 MXene 纳米片涂层,形成具有类海胆状微观结构的传感界面。该传感器不仅具有优异的拉伸强度 (18.87 MPa)、高拉伸性 (1190%) 和与人体皮肤相近的弹性模量 (1.7 MPa),而且展现出高灵敏度 (高达 784.02 kPa^{-1})、低检测下限 (0.12 Pa) 和出色的循环稳定性,为智能人机交互提供了强有力的技术支持。此外,该传感器还具备高效的光热性能,为实现按需光热治疗提供了新的解决方案。

D17-P05

基于 Nafion 电解质的甲醛电化学传感器研究

邵宇轩^{1,2}, 魏峰*^{1,2}, 郭伟清^{1,2}, 金庆喜¹

1. 中国有研科技集团智能传感功能材料国家重点实验室

2. 有研(广东)新材料技术研究院

甲醛(HCHO)是一种有毒、致敏和致癌物质,长期暴露在高浓度甲醛环境下会对人体健康造成危害,因此,在室温条件下实现对甲醛的高灵敏、高选择性检测至关重要。本文在平面丝网印刷电极上采用两步滴涂法制备了一种以 60% Pt/C 催化剂为传感层,以 Nafion 为固态电解质的甲醛电化学传感器,实现了室温下高灵敏 ($0.2\text{ }\mu\text{A/ppm}$)、宽线性响应范围(HCHO 浓度为 500 ppb - 100 ppm)和低检测限 (2.5 ppb)的

HCHO 传感检测，并且器件具有良好的选择性和长期稳定性（>15 天）。在实现高性能 HCHO 传感检测的同时，器件制备方法简易、成本低廉。未来，这种基于 Nafion 电解质的甲醛电化学传感器有望广泛应用于实际环境监测和人体呼出气疾病筛查等领域。

D17-P06

微针介导的基于反向离子渗透技术的皮下间质液葡萄糖监测器件

姚蕤，江国华*

浙江理工大学

血糖浓度作为一种针对糖尿病（DM）及其相关疾病的关键检测指标，反映了机体对葡萄糖的吸收与代谢水平。微针（MN）作为一种有效但微创的技术能够实现真皮间质液的提取。同时，利用反向离子电渗疗法（RI）与多孔微针结合增强经皮分子转运。在这里，我们描述了一种基于多孔微针与修饰丝网印刷电极（SPCE）结合，利用微电路板提供电源从而实现反向离子电渗疗法的葡萄糖传感装置。首先，通过对低成本的丝网印刷碳电极进行 ePDA 电子介质层的电沉积修饰，再进行葡萄糖氧化酶的交联滴铸，开发了基于酶的葡萄糖传感器。同时，借助随机分布微小孔洞的 PGMA 基聚合物多孔微针，创建真皮间质液提取至修饰电极表面的通道，从而利用间质液中血糖分子与修饰丝网印刷电极表面的葡萄糖氧化酶（GOx）反应产生电流，用于评估血糖水平。该装置在 0 mM ~ 18 mM 的血糖浓度范围内具有良好的检测精度（ $R^2 > 0.99$ ），灵敏度达到 11.23 $\mu\text{A}/\text{mM}/\text{cm}^2$ 。这种小巧的低侵入性葡萄糖监测贴片为慢性疾病的实时监测提供了有力帮助。

D17-P07

基于磁性微结构的柔性电容式压力传感器

张琪，巫远招*，刘宜伟，李润伟

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

柔性电容式压力传感器在推动人工智能、物联网（IoT）发展等方面发挥着关键作用。其中，对介质层的微结构化是提高传感器灵敏度的有效途径。本工作提出了一种磁场诱导自组装磁性微针阵列介质层的制备方法。通过调整工艺参数，即动态磁场的强度和磁性微粒的浓度，精确地控制磁微针阵列的形貌并制备出互锁微针阵列的柔性电容式压力传感器，该传感器具有高灵敏度（4.11 kPa^{-1} ）、超快响应时间（20 ms）、长期循环稳定性（ ≈ 1700 ）和优异的柔韧性，可以实时监测各种活动，如人体脉搏监测、握力感知、呼吸频率监测和头部运动监测，在健康监测、人机交互等领域展示着良好的应用前景。

D17-P08

Thermal Response Color-Tunable Electroluminescent Device for Real-Time Visual Temperature Monitoring

Xiaohui Sun, Linjie Zhi*

China University of Petroleum (East China)

Alternating current electroluminescent (ACEL) devices, which have attracted tremendous attention due to their significant applications in bioinspired electronics, smart wearables, and human-machine interfaces, still face limitations in real-time visual temperature sensing. Herein, a strategy is established to achieve real-time temperature dynamic visualization by utilizing the filter effect of thermochromic layer. Taking advantage of the filter effect of thermochromic layer, the thermochromic layer is cleverly integrated into the electroluminescent device through a simple rotating coating operation. This elaborate integration permits the device to display a wide array of luminous colors and achieve high-contrast color transitions in response to ambient temperature variations. More importantly, the quantitative relationship is established between temperature and changes in luminous color and brightness. This advancement not only enhances multi-color emission capabilities but also enables the display of diverse information, marking a significant stride in the development of dynamic temperature sensing in ACEL devices.

D17-P09**ZnCo₂O₄/In₂O₃ p-n Heterojunction Microflower for Conductometric Formaldehyde Gas Sensors**

Yuting Shuai, Wenhao Shen*

South China University of Technology

Formaldehyde (HCHO), a toxic volatile organic compound, poses significant risks to human health and the environment. In this study, we synthesized ZnCo₂O₄/In₂O₃ p-n heterojunction microflowers using the hydrothermal method for HCHO detection. The synthesized samples were characterized using the techniques of X-ray diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM), and Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-vis). Among the materials of pure ZnCo₂O₄, In₂O₃, and various compositions of ZnCo₂O₄/In₂O₃ (1%, 3%, and 5%), the prepared 3% ZnCo₂O₄/In₂O₃-based sensor exhibited high gas response (58.73) to 30 ppm HCHO, which was 16 times higher than that of pure In₂O₃ at 258°C. In addition, the prepared ZnCo₂O₄/In₂O₃-based sensor also had fast response/recovery time (51/52 s), good humidity resistance, favorable selectivity to HCHO, and a low detection limit of 63 ppb for HCHO. Furthermore, the superior HCHO gas sensing performance of 3% ZnCo₂O₄/In₂O₃ could be attributed to the formation of ZnCo₂O₄/In₂O₃ p-n heterojunctions, high specific surface area, and fast electron transfer efficiency. Thus, coupling In₂O₃ with ZnCo₂O₄ to form ZnCo₂O₄/In₂O₃ implies an effective strategy for enhancing HCHO gas-sensing performance.

D17-P10**Computational-Assisted Mechanism Study of Hydrogen Sulfide Sensing by CuO Synthesized via Various Methods: Insights into Oxygen Vacancies and Surface Chemistry**

Qiangyong Tang, Wenhao Shen*

South China University of Technology

Hydrogen sulfide gas poses significant health hazards even at lower concentrations, underscoring the need for room-temperature hydrogen sulfide sensors. Variability in CuO's sensitivity to hydrogen sulfide is considerable in existing studies, yet the underlying response mechanism remains underexplored. This study synthesizes CuO using five methods possessing a gradient changed sensing performance. The Response values of CuOs synthesized by the methods of stirring (CuO-s), hydrothermal (CuO-h), and adding NH₃·H₂O (CuO-n) are 77, 40, and 4.3 to 0.1 ppm H₂S respectively, but the samples by calcining (CuO-c) and adding Polyvinyl pyrrolidone (CuO-p) are low as 1.47 and 1.13 to 1 ppm H₂S individually. The oxygen vacancies and surface element states of the prepared CuOs are analyzed via X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), while alkaline and acidic sites are characterized using Temperature Programmed Desorption of CO₂ (TPD-CO₂) and NH₃ (TPD-NH₃). Density Functional Theory (DFT) calculations assess gas adsorption energies. The results indicate a direct link between oxygen vacancies, H₂S adsorption sites, and sensor response. The process involves lattice oxygen loss and multi-oxidation of H₂S. Furthermore, long-term instability is attributed to excessive H₂S oxidation on CuO surfaces.

D17-P11**MXene/纳米纤维素柔性复合膜的制备及电磁屏蔽性能研究**

程浩然, 雷达, 张海琛*

佛山大学材料科学与氢能学院

随着电气通信设备的微型化和高性能化, 电磁波干扰或电磁辐射污染的问题日益突出。良好电磁屏蔽性能的柔性膜材料具有很好的应用潜力。MXene 是一种具有亲水表面和高金属导电性的新型二维化合物, 近年来在电磁干扰屏蔽领域引起了人们的极大兴趣。然而, 单纯 MXene 薄膜易碎的特性限制了其在电磁屏蔽方面的实际应用。本研究旨在开发一种柔性的且具有高电磁屏蔽性能的纳米纤维素基复合材料, 本研究通过负压过滤诱导的自组装过程制备了超薄且高度柔性的 MXene/纤维素纳米纤维 (CNF) 复合膜。以纳米纤维素作为 MXene 薄层之间的分子交联剂, 增强 CNF 与 MXene 薄层的相互作用实现了 MXene/CNF

复合膜的二元强化和增韧，从而获得高拉伸强度，以及优异的耐折性。此外，MXene/CNF 复合膜在超薄厚度（厚度 20 μm ）下表现出优异的 EMI 屏蔽效能，在 8.2-12.4GHz（X 波段）内达到 33dB。

D17-P12

用于神经反馈的各向异性电子皮肤

胡文亚，宋德魁，刘楠*

北京师范大学

基于大脑节律的神经反馈训练在认知神经科学和疾病治疗中都很有吸引力。然而，目前仍然缺乏能够集记录和反馈双重功能于一体且信号互不妥协的电极。在此，我们通过温度调控电导率，开发了一种各向异性纤维素碳海绵（CCS）电极，具有记录电生理信号和感知压力作为反馈信号的双重能力。该电极对 CCS 进行梯度温度退火，其中包括较低温（300 $^{\circ}\text{C}$ ）和较高温（1000 $^{\circ}\text{C}$ ），分别得到 CCS-LT 和 CCS-HT。CCS-LT 在垂直于 CCS 取向方向上具有弹性，CCS-HT 在平行于 CCS 取向方向上具有较低的面电阻（ $\sim 13 \Omega \text{sq}^{-1}$ ）。CCS-LT 具有出色的灵敏度（1.04 kPa^{-1} ），快速的响应时间（27 ms）和可靠的 1000 次循环稳定性，能够用于压力传感。CCS-HT 可以作为电生理传感的皮肤电极。退火 CCS 的各向异性功能使其可以应用于一个由神经驱动的传感和调节闭环系统中，实现对大脑节律和外部设备物理信息的准确采集。这不仅有助于快速跟踪大脑活动，而且有助于反馈调节以增强人类大脑功能，在神经反馈和疾病康复方面具有很大的应用潜力。

D17-P13

基于导电金属-有机框架的多功能 MXene 生物传感器用于医疗监测

林欣昀¹，宋德魁¹，邵天赐²，薛婷¹，胡文亚¹，蒋文超³，邹小勤²，刘楠*¹

1. 北京师范大学

2. 东北师范大学

3. 北京石墨烯研究院

实时监测代谢性疾病要求能同时监测代谢物含量、诊断肌力。然而，这种同时检测化学和生物电位信号功能的生物传感器很少有报道。本研究设计了一种集汗液尿酸和葡萄糖电化学检测、电生理信号采集和电刺激治疗于一体的多功能生物传感器。采用高导电性 MXene 和多孔导电金属-有机骨架（c-MOF, $\text{Ni}_3(\text{HITP})_2$ ）制备了 MOF/MXene 电极。与商用 Ag/AgCl 凝胶电极相比，MOF/MXene 电极具有更低的电极/皮肤界面阻抗、更高的稳定性和信噪比。同时利用 MOF/MXene 电极的高电荷存储容量，还可实现电刺激肌肉治疗。此外，c-MOF 提供了丰富的电化学活性区域，在检测汗液代谢物方面表现出优异的电化学性能。这种集成生物传感器检测到的多模态信号通过无线传输到移动终端，在肌肉治疗和日常无创监测方面显示出巨大的潜力，根据结果可为高尿酸血症或高血糖患者提供营养指导。