

D15 纳米发电机与压电电子学

时间：2023 年 7 月 8-10 日

地点：深圳国际会展中心

分会主席：

王中林

中国科学院北京纳米能源与系统研究所

Sang-Woo Kim

Sungkyunkwan University

Wenzhuo Wu

Purdue University

翟俊宜

中国科学院大学

董 凯

中国科学院北京纳米能源与系统研究所

联系人：

胡卫国

中国科学院北京纳米能源与系统研究所

电 话：18500289861

邮 箱：huweiguo@binn.cas.cn

D15.纳米发电机与压电电子学（国际会场）**分会主席：王中林、Sang-Woo Kim、Wenzhuo Wu、翟俊宜、董凯****D15-01****待定**

王中林

中国科学院北京纳米能源与系统研究所

D15-02**Biomass based triboelectric wearable sensors**Wenzhuo Wu^{1,*}

1. Purdue University

The capability of sensor systems to efficiently scavenge their operational power from stray, weak environmental energies through sustainable pathways could enable viable schemes for self-powered health diagnostics and therapeutics. Triboelectric nanogenerators (TENG) can effectively transform the otherwise wasted environmental, mechanical energy into electrical power. However, obstacles hindering the development of efficient triboelectric devices based on biocompatible materials continue to prevail. I will discuss our recent progress in the design and engineering of biomass materials for biocompatible, wearable triboelectric devices.

Such wearable devices are conformable to human skins and can sustainably perform non-invasive functions, e.g., gesture recognition and health monitoring, by harvesting the operation power from the human body. The gained fundamental understanding and demonstrated capabilities enable the rational design and holistic engineering of novel materials for more capable biocompatible triboelectric devices that can continuously monitor vital physiological signals for self - powered health diagnostics and therapeutics.

Key words Triboelectric sensors, wearable device, biomass materials

D15-03**柔性微纳传感器件的智能制造及应用**杨维清^{1,*}

1. 西南交通大学

针对国防军工、重大工程和战略新兴产业对金属棒线材精密轧制的重大需求，基于柔性压电材料从材料优化、器件设计、系统集成和应用示范的角度形成“料-器-集-用”的全套技术创新链，解决了三辊智能轧制装备在线监测的难题，辅助实现了金属棒线材的高质量轧制。具体针对压电换能材料换能过程中界面力电耦合机制不明确、换能效率低的科学挑战，提出多维度界面及结构设计优化力电耦合效率的新思路，实现了多维度复合材料界面的可控构筑，显著提升了材料的换能效率，缓解了材料在集成化、微型化过程中的性能衰退，提升了后续器件的能量收集效率及感知灵敏度，为一体化集成系统的构筑奠定了基础。基于此，研制了高性能压电复合材料、微型振动传感器件以及一体化无线监测集成系统，实现了特种钢智能三辊精密轧制装备运行状态实时监测、故障诊断及反馈调节的应用示范，辅助产品轧制精度突破 0.02 mm。项目成果得到了以国内棒线材轧制领域泰斗王国栋院士为首的评价委员会高度好评，认为该成果核心技术自主可控，打破了国外对线材轧制技术的长期垄断，填补了国内空白，总体技术处于国际先进水平。另外，成功将共性技术拓展应用到高铁轮对、航空发动机等超高 g 值系统的无线监测和智能战士头盔等装备中，为智能制造、智能交通和智能国防重大战略装备的在线监测提供了重要的技术支撑与理论指导。

关键字 微纳传感，压电材料，智能监测，智能制造

D15-04

生物分子基压电纳米材料的合成和纳米发电机应用最新进展

杨如森^{1,*}

1. 西安电子科技大学

结构简单且自组装性能优异的生物分子被用于合成多种纳米结构，其优异的压电性质为研究生物材料的机电特性提供了一种可能。我们对基于氨基酸、肽等生物分子基材料开展了仿真计算和实验室研究，并发现具有优异机械、电子、压电性能的新材料。以苯丙氨酸二肽（FF）为例，我们通过液相合成法获得了直立 FF 二肽微米柱并随后获得了水平排列的 FF 二肽微米柱，发现在生长过程中施加电场可合成出自发极化方向和施加的电场方向一致微米柱，随后开展了基于 FF 二肽微米柱在能量收集方面的应用研究，研制了压电式纳米发电机、复合纳米发电机和柔性纳米发电机。我们揭示了生长过程中施加电场对 FF 二肽自组装的影响，开发的极性可控生长方法有效避免了对合成出的微米柱施加强电场极化处理失效的困难，实验和仿真证明肽基纳米发电机在相同压力下可以输出高于氧化锌纳米线基纳米发电机的开路电压，并具有很好的机械稳定性。该项研究为具有优异压电性质的生物材料的可控生长提供了新思路，为生物分子基柔性器件在能量采集、生物传感等领域的应用开辟了新方向。

关键字 氨基酸、二肽、纳米发电机、压电、生物分子

D15-05

从 0-1 的新发现到碰磁理论

曹霞^{1,2,*}

1. 北京纳米能源与系统研究所

2. 北京科技大学

你能想象两个小石头碰撞就能发电，并且能点亮小灯吗？你能想象用手敲门可以点亮 LED 灯板，可以照亮眼前的书籍吗？你能想象只要手拿日光灯管，走路就能把灯管点亮吗？原来发电如此简单，我们轻轻摩擦塑料板产生的能量至少能点亮一瓦灯泡，甚至还可以给手机充电。任何科学理论和科学发现都是人类阶段性认知的产物，没有一项科学理论是绝对正确和一成不变的，会随着新的发现而不断地发展和完善。我们通过以上系列实验发现提出了“碰磁理论”，即碰撞产生电磁场理论。我们还发现在没有任何外部磁铁的情况下，在变化的电场或静电场中旋转闭合线圈，线圈中也能产生感应电流和电动势。我们把这一发现称作电电感应，麦克斯韦位移电流和电电感应产生的感应电流都是由变化的电场产生的。同时结合这些最新发现和新的理论，我们对多个传统理论进行了完善和新视角的审视，包括动量守恒定律、碰撞理论（力学）、万有引力理论、滑动摩擦力和滑动摩擦力做功、引力波、暗物质、麦克斯韦方程组等。曹霞教授这一系列完全从 0 到 1，颠覆人们传统认知的发现和发明，如同打开一扇门，必将在物理、地质、天文、新能源、核能、军事等领域产生不可估量的影响，并推动相关产业乃至全球经济的革命性、颠覆性进步。

关键字 麦克斯韦方程组；碰磁理论；电电感应；场电流；新能源

D15-06

提升摩擦纳米发电机效率和耐久性的策略

胡陈果^{1,*}

1. 重庆大学

摩擦电纳米发电机是解决无线传感器网络分布式能量供应问题的重要技术之一。但其输出效率低和界面磨损，阻碍了其实际应用。摩擦材料界面接触不良、空气击穿效应和电荷产生能力不足是影响 TENG 电荷密度的主要因素。界面机械磨损和热损耗是 TENG 面对的另一个挑战，它限制了 TENG 的使用寿命和实际应用价值。本文中，我将介绍课题组在提高 TENG 输出性能和减小界面磨损采取的策略，包括电荷激励、

材料改性和增强接触效率；间歇接触模式、非接触模式、静摩擦模式和液体润滑模式等。阐述电荷输运机理和获得电荷极限输出的设计方法。

参考文献

1. Nature Communications, (2021) 12:4689.
2. Nature Communications, 2020, 11:1599.
3. Nature Communications, 2020 11:4277.
4. Nature Communications, 2019, 10:1426.
5. Advanced Materials, 2022, 34, 2105882.
6. Advanced Materials, 2022, 34, 2109918.
7. Advanced Functional Materials, 2022, 32, 2202055.
8. Advanced Functional Materials, 2022, 32, 2204322.
9. Advanced Functional Materials, 2022, 32, 2109918.
10. Research, 2022, 2022, 9812865.

关键字 摩擦纳米发电机, 电荷密度, 界面磨损

D15-07

碳基表皮电子系统

胡又凡^{1,*}

1. 北京大学

提供与生物表面适形接触以获取生理信息的表皮系统在各种医疗监测、诊断和治疗应用中具有重要意义。通常，电子系统和生物组织之间需要一个紧密的界面，以确保稳定的高保真信号记录。在这里，我们展示了我们最近在构建这样的表皮系统以从人体表面监测生理信息方面取得的进展的几个例子，该系统集成了柔性传感器、基于碳纳米管的电路和存储器，展示了下一代可穿戴设备用于个人健康的巨大可能性。

D15-08

Flexible Piezoelectret/Piezoelectric Sensors and Actuators for Human-Machine Interactivity

Junwen Zhong^{1,*}

1. University of Macau

A fully interconnected and intelligent living environment has been a grand challenge for future smart society and it is critically essential to develop the interactive sensing and actuating systems to bridge the human-machine interfaces. Here, flexible sensors and actuators based on high-performance piezoelectret or piezoelectric polymers are fabricated to selectively perform either the actuating or sensing function. As sensors, both low pressure detection limit for sensing resolution and excellent stability have been achieved, with typical application in monitoring human pulse signals for health diagnosis. As actuators, mechanical vibrations with large output force have been produced for providing haptics feedback to human skin. Such actuators are also used to construct soft robotics with high agility and controllability to explore surroundings, like detecting gas leakage. The design principle together with the sensing and driving characteristics can be further developed and extended to other soft matters and flexible devices.

Key words Nanogenerators, Wearable sensors, Soft actuators, Piezoelectret, Human-Machine Interactivity

D15-09

Bilateral Piezoelectric Charge Modulation——A Perspective of Piezo-Phototronic Effect in Multi-Layer Structured Optoelectronic Devices

Wenbo Peng^{1,*}, Fangpei Li², Chenhong Wang¹, Yongning He¹

1. Xi'an Jiaotong University

2. 西北工业大学

Piezo-phototronic effect utilizes the strain induced piezoelectric charges inside the piezoelectric semiconductors to modulate the local energy band diagram at the interface of junctions, thus controlling the photo-generated carriers' behaviors and the performance of optoelectronic devices. Since its invention in 2010, piezo-phototronic effect is vastly demonstrated in photodetectors, light-emitting diodes, and solar cells, where only one interface is modulated by piezoelectric charges. In 2018, we first propose to construct multi-layered structure for efficient utilization of piezoelectric charges with both polarities and obtain better performance optimization by piezo-phototronic effect^[1], which we recently name as Bilateral Piezoelectric Charge Modulation. Here, we summarize the recent progresses of our researches on bilateral piezoelectric charge modulation, including both experimental results and analytical theories.

An n-ZnO/p-Si/n-ZnO double heterojunction bipolar phototransistor is designed, and the regulation of bilateral piezoelectric charges on bipolar phototransistor's performances is studied from the perspectives of theoretical derivation and experimental research simultaneously. A theoretical model of n-ZnO/p-Si/n-ZnO double heterojunction bipolar phototransistor is established, and the influence of four polar combinations of piezoelectric charges induced by different strains formed at the interface of two heterojunctions on the characteristics of phototransistor is carefully studied. The theoretical calculation results show that, when positive piezoelectric charges are generated at both two interfaces, the regulation of strain on the phototransistor is a superposition of two positive effects, which can significantly improve the performances of phototransistor. Then an n-ZnO/p-Si/n-ZnO double heterojunction bipolar phototransistor is experimentally prepared. By rationally designing the device structure, positive piezoelectric charges could be simultaneously generated at the two heterojunction interfaces when an external compressive strain is applied. The saturation current of phototransistor is significantly improved, and the photoresponsivity is also improved to a certain extent by the applied compressive strain. To further optimize the performances, the effects of interdigitated electrode's size, substrate and ZnO layer on the strain regulation of device performance are carefully studied. The experimental results show that when the p-Si substrate is used, the size of interdigitated electrodes is chosen as channel width $W_0 = 80 \mu\text{m}$, the channel length $L = 5 \mu\text{m}$, and the number of electrodes $N = 14$, and the ZnO nanowires layer prepared by low temperature hydrothermal growth method is used as both emitter and collector, the strain induced bilateral piezoelectric charges regulation of the obtained bipolar phototransistor is the best. At a compressive strain of -1.37%, the photoresponsivity is enhanced from 0.96 A/W to 20 A/W with an increase of about 2000%, indicating the significant modulation of applied strain on the performances of heterojunction bipolar phototransistor.

References

[1] Fangpei Li, Wenbo Peng, Zijian Pan, and Yongning He, Optimization of Si/ZnO/PEDOT:PSS tri-layer heterojunction photodetector by piezo-phototronic effect using both positive and negative piezoelectric charges, Nano Energy, 2018, 48, 27-34.

Key words Piezo-Phototronic; Heterojunction Bipolar Phototransistor; Bilateral Piezoelectric Charge Modulation

D15-10

压电电子学调控的 AlGaIn/GaN HEMT

胡卫国^{1,*}、化麒麟¹

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, CAS, China

AlGaIn/GaN HEMT 是备受关注的新一代功率器件，在电力电子、功率射频等领域有着重要应用价值。自发/压电极化效应是 AlGaIn/GaN HEMT 形成高浓度、高迁移率的二维电子气的关键因素。王中林院士指出极化电场能有效调制器件能带结构，影响着量子跃迁、复合、载流子输运等关键物理过程，从而制约着电子、光电子器件的性能^[1]。随着近年来人机交互技术和可穿戴电子设备的迅猛发展，压电极化效应也提供了微纳电子/光电子器件与外界机械应变实现有效、灵活、无缝交互的新途径，在智能传感、环境监控、物联网、人机交互等领域有潜在应用价值。

我们耦合压电本构方程-泊松-薛定谔方程，进一步发展了氮化镓压电能带理论；采用金属有机物化学气相沉积和湿法刻蚀技术，研制了柔性 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管（HEMT）阵列；研制了 HfZrO 新型钝化层，降低漏电流，提高开关比；开发基于异向/同向的复合刻蚀技术，一次成型 AlGaIn/GaN HEMT 微悬臂，借鉴生物的条件-非条件反射层级控制系统，实现微弱机械信号对大功率密度电力的直接、实时、可编程调控^[2]。这些研究加深了我们对压电电子学的理解和认识，为优化 GaN 电力电子器件性能提供新途径，有望开拓其在自动驾驶、仿生机器人、自动控制等新应用。

参考文献

1. X. Wang, J. Song, J. Liu, Z. L. Wang, Science 316, 102 (2007)
2. Shuo Zhang, Bei Ma, Xingyu Zhou, Qilin Hua*, Jian Gong, Ting Liu, Xiao Cui, Jiyuan Zhu, Wenbin Guo, Liang Jing, Weiguo Hu*, and Zhong Lin Wang*, Nature Communications 11, 326 (2020)

关键字 压电电子学、氮化镓、电力电子器件

D15-11

多种静电纺丝法制备的 PVDF 纳米纤维的压电性比较及应用

任凯亮^{1*}、张双哲¹、蒋丰营¹

1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所

压电聚合物聚偏二氟乙烯（PVDF）被广泛用于能量收集和传感器应用之中，其压电性源于非对称的极性晶体结构（ β 相）和及其在电场下的取向。通常认为，静电纺丝（ES）能够提高 PVDF 的 β 相结晶度和压电性。在这项研究中，我们研究了三种类型的静电纺丝法，包括近场静电纺丝法（NFES），远场静电纺丝法（FFES-整齐排列），以及远场静电纺丝法（FFES-随机分布）制备 PVDF 纤维，并比较其压电性，用于制作一步极化的 PVDF 膜，为了比较 PVDF-NFES 纤维的压电性，将 PVDF-NFES 纤维阵列封装在聚乳酸（PLA）中。结果表明，近场静电纺丝制备 PVDF 的具有最强的压电性。在 2 Hz 的剪切力作用下，PVDF-NFES-PLA 在 d31 模式下的电流密度为 75.63 pA cm⁻²，是远场静电纺丝法制备的 PVDF-（17.62 pA cm⁻²）的 4 倍。同时，我们还将研究静电纺丝法制备的 PVDF 纳米纤维，以及聚左旋乳酸（PLLA）纳米纤维在促进细胞增值方面的应用。

同时，我们使用了静电纺丝法制备了 PVDF-TrFE 纳米纤维，并对其进行了极化。我们发现极化后的 PVDF-TrFE 纳米纤维可以提高成纤维细胞的增殖率达 60% 以及促进小鼠的表皮组织愈合。对于聚左旋乳酸（PLLA）来说，其偶极子和聚合物主链之间有 125 度的夹角，因此远场静电纺丝法可以导致其产生沿着 PLLA 纳米纤维方向的压电性，我们研究了其在促进神经细胞增值方面的应用。

D15-12

基于低维半导体异质结光电探测器的研究

黄鑫^{1*}、胡卫国²、王中林^{2,3}、顾长志¹

1. 中国科学院物理研究所

2. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所

3. 佐治亚理工学院

光电子器件是当今社会生活和应用中必不可少的部分，大多数是基于低维半导体异质结构，其中包括各种外延生长的无机半导体，如 Si、III-V 族氮化物和二维材料等。在宽禁带半导体中，III-V 族氮化物半导体（GaN、InN 和 AlN）及合金材料因其独特性质成为了宽光谱光电探测器件中最有前途的候选者之一。由于非对称晶体结构，氮化物半导体平面结构在晶格不匹配的衬底上生长时，由于应变会在异质结界面处引起压电极化效应，严重影响器件性能。为了解决这一问题，我们提出了一种自洽的压电光电子学理论模型来优化 GaN/InGaN 能带结构。在此基础上，我们进一步利用压电光电子学效应实现了对 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池短路电流密度、开路电压和转换效率的优化。近年来以石墨烯、过渡金属硫化物、黑磷等为代表的二维材料已成为光电子器件领域研究的热点，但由于其原子级的厚度不能获得理想的光吸收，限制了其在光电子器件领域的潜在应用。针对上述问题，我们分别采用非对称法布里-珀罗光学谐振腔结构和“硅基光波导+二维材料”混合集成结构，实现了在可见光波段处光电探测系数 5 倍的增强和外量子效率 4 倍的提升，以及室温 1V 偏置电压下光电探测系数在 3.68 μm 与 4.0 μm 激发波长下分别高达 23 A/W 与 2 A/W，其性能指标达到国际期刊报道的较高水平。

关键字 低维半导体，异质结，压电光电子学，光电探测器

D15-13

可采集全海域波浪能的半米级摩擦纳米发电机

刘官林^{1,*}、冯军瑞¹

1. 广西大学

机械能的采集对构建新型能源网络和智慧蓝色能源系统至关重要。近年来，摩擦纳米发电机在有效收集低频海洋波浪能转化为电能方面表现出独特的优势，成为发展新型可持续能源的科学技术。但以往波浪能摩擦纳米发电机的尺寸远小于波浪波长，或不利于波浪采集。对此，我们提出了首个 0.5 米尺寸的波浪能摩擦纳米发电机，向摩擦纳米发电机大型化迈出了一步。该发电机的双侧叠层设计可有效解决大尺寸摩擦纳米发电机摩擦层接触分离困难的问题，相较于小尺寸摩擦纳米发电机拥有更高的采能效率。此外，该器件还具有高波浪响应能力、抗倾覆能力、自回复能力、高摩擦层体密度等优良性能，可适用于全海域波浪能采集。0.5 米尺寸的摩擦纳米发电机可为海洋环境应用的器件提供工作时间长、便捷、无排放和无污染的可持续供电方案，在海洋钻井平台与海上孤岛供电方面具有一定前景。

关键字 纳米发电机、水波能、蓝色能源、弹簧钢片

D15-14

分子动力学模拟在压电能量采集研究中的应用

谭丹^{1,*}

1. 西安电子科技大学

压电能量采集可以将周围环境中的能量收集起来，驱动纳米器件独立、持久、长时间免维护运行。分子动力学模拟根据牛顿运动定律，跟踪系统中每个粒子的运动轨迹，从而预测宏观可测量（如温度、能量、热导率等）。在压电能量采集的理论研究过程中，分子动力学模拟方法可从原子角度理解纳米结构的压电特性，包括计算氧化锌纳米线在形变过程中产生的压电电势、计算多层二硫化钼的压电常数、计算二维氧化锌结构在弯曲状态下产生的面外压电极化强度变化、研究以二维材料为主体的压电悬臂梁能量采集器的性能输出等等，这些模拟计算建立了理论分析与实验测量之间的联系，对于优化压电能量采集器的性能与设计有重要作用。

D15-15

Strong piezoelectric response in layered nanosheets for piezoelectric device application

Jianhua Hao^{1,*}

1. The Hong Kong Polytechnic University

Among various functionalities, 2D materials possessing piezoelectricity widely employed for applications in energy harvesters, actuators, and sensors. Due to the ultrathin dimension and the remarkable mechanical endurance against large strain, 2D piezoelectric materials are promising to be employed for nanoscale devices achieving high performance and low power consumption, motivating researchers to explore novel low-dimensional piezoelectric materials with strong electromechanical effects. It is important to study on the piezoelectric effect of this vdW layered material when approaching the 2D limit. Particularly, it is required to explore more potential applications in the nanoelectronics utilizing their piezoelectric properties. Herein, we quantitatively and systemically evaluate the thickness-dependent large piezoelectric coefficients in two kinds of piezoelectric nanosheets using piezoresponse force microscopy (PFM) technique. Piezotronic effect in the layered nanosheets is demonstrated under stresses. We explore the investigation of the layered nanosheets-based piezoelectric nanogenerators and evaluate their device performances. Our work reveals the strong piezoelectricity in 2D nanosheets and its great potential in nanoscale piezotronics and energy harvesting applications on various substrates. The works are supported by the grants from the National Natural Science Foundation of China (No. 51972279), Research Grants Council of Hong Kong (PolyU GRF PolyU 153025/19P), and PolyU Otto Poon Charitable Foundation Research Institute for Smart Energy (Q-CDBD).

Key words ultrathin film synthesis; piezoelectric response; piezoelectric nanogenerator

D15-16

自供能医疗器件和电刺激治疗

李舟^{1,*}

1. 北京纳米能源与系统研究所

电活动是人体生命活动的基础，调控电活动就可以改变细胞、组织和器官的兴奋和抑制状态，从而实现疾病的治疗。纳米发电机是一种可将低频机械能转换为电能的新型能源转换器件，并且因为器件结构多样、可柔性化、可纺织、可选择材料多种多样、输出电压高等优点，获得了研究者的关注。我们通过纳米发电机将人体运动的机械能高效的转换为电能并给电刺激器件和生物传感器供电，构建自供能的电子医疗器件和医疗传感器，开展了较系统的研究工作。比如利用心跳发电，可驱动心脏起搏器长期工作，构建了能与人体共生的心脏起搏器，并首次在大动物实验中完成了提升心率和治疗心律失常的研究；构建了可降解自供能电刺激器件，用于调控神经细胞生长方向、增强心肌细胞间的电整合、促进成骨细胞增殖和分化、加速皮肤伤口愈合，而且在完成治疗过程以后器件可被机体完全吸收；还有可微创植入，生物相容性好的自驱动心血管生物传感器器件的研究等。这些研究工作围绕自供能电子医疗器件和电刺激治疗，具有转化为临床使用的电子医疗器件和医疗传感器的重要潜力。

关键字 自供能 纳米发电机

D15-17

柔性摩擦电式压力传感器

孙旭辉^{1,*}

1. 苏州大学

柔性压力传感器因其在健康监测、可穿戴设备、电子皮肤和智能机器人等方面的潜在应用而备受关注。随着物联网的快速发展，考虑到大量使用的传感器，功耗在他们的大规模应用中也扮演了一个关键角色。

基于摩擦纳米发电机的新一代自供电柔性压力传感器在功耗和潜在性能方面具有无可比拟的优势。基于摩擦起电和静电感应的耦合效应，通过分析电输出信号，可以获得有关机械输入的信息，例如幅度和频率。为满足实用性的需求，我们开展了系统的研究致力于提高摩擦电压力传感器的传感性能。本报告将系统介绍自供电摩擦电压传感器在材料、结构和应用方面的主要进展，对压力传感性能优化的理论基础、影响机理和途径进行综合分析，总结摩擦电压力传感器在不同压力范围和工作频率下的典型应用。最后，还将讨论自供电摩擦电压力传感器的发展前景。

D15-18

Materials and devices for flexible/wearable self-charging power system

Fang Yi^{1,*}

1. Sun Yat-sen University

Energy crisis is one of the hottest topics revolving around the world. With the rapid development of flexible/wearable electronics, their energy sources become a big challenge. Flexible/wearable self-charging power systems are a promising approach to address this challenge, which power electronics by harvesting energy from the environment or human body. Here, I will talk about our recent works on the design and fabrication of materials/devices for applications in flexible/wearable self-charging power systems. We developed highly adaptive triboelectric nanogenerators, multi-model sensors, and supercapacitor electrode materials with high performance for flexible/wearable self-charging power systems; and demonstrated the sustainable operation of various wearable electronics by the self-charging power systems. The correlative design principles, working mechanisms and future challenges will also be discussed.

D15-19

基于摩擦纳米发电机和介电弹性体发电机的“双赢”杂化发电单元

王雪^{1,*}、郭俊¹、刘文林¹、曾启煊¹、王中林²

1. 重庆大学

2. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所

摩擦纳米发电机（TENG）和介电弹性体发电机（DEG）都是非常具有潜力的能源转换技术。但由于它们自身的固有特性，包括空气击穿效应导致的 TENG 低输出能量，以及 DEG 的启动需要一个额外的极化电压等，使得这两种发电技术仍然面临很大的局限，严重限制了它们的实际应用。在此，我们首次提出将 TENG 与 DEG 耦合，建立一个双赢的自激混合发电机（命名为 TDHG），用于采集分布式的环境高熵能源。实验结果表明，这种新型的 TDHG 的输出电荷比传统的电荷激励型 TENG 增强了 5 倍，而且通过简单的机械触发也实现了 DEG 的持续运行。更重要的是，由于 TENG 贡献的高峰值功率和 DEG 保证的长输出脉冲时间，与单独的 TENG 或 DEG 相比，TDHG 实现了更高的能量转换效率，高达 32%。这项工作为杂化纳米发电机的开发提供了一种新的设计理念，有望实现高效的机械能转化。

关键字 摩擦纳米发电机，介电弹性体发电机，自激励，双赢杂化发电单元

D15-20

复合与耦合纳米发电机

杨亚^{1,*}

1. 北京纳米能源与系统研究所

提出了通过电磁发电和摩擦发电两种不同的原理来实现同一种机械能到电能转换效率提升的普适性

方法，被美国、韩国等 20 多个研究小组广泛采用。提出了利用同一种功能材料的多种物理效应来协同发电增强发电性能的新思路，揭示了多物理耦合效应增强发电性能的机制。首次开发了基于多种物理效应耦合一体式的复合纳米发电机，解决了不同类型纳米发电机的集成度低和成本高的难题。提出了通过界面与能带工程调控光伏器件的新策略，揭示了外部温度对光伏器件的调制规律，建立了温度变化诱导的极化电荷调控界面势垒高度提高光伏器件性能的新方法。

参考文献

1. Ya Yang*. "Hybridized and Coupled Nanogenerators. Design, Performance and Applications", DOI:10.1002/9783527346332, Publisher : Wiley-VCH, 2020.
2. Ya Yang*. "Pyroelectricity gain in multilayers", Nature Energy, 2022, 7, 1007-1008.
3. Yang Wang, Heting Wu, Lin Xu, Hainan Zhang, Ya Yang*, and Zhong Lin Wang*. "Hierarchically patterned self-powered sensors for multifunctional tactile sensing", Science Advances, 2020, 6, eabb9083.
4. Mingqiang Liu, Jia-Ao Wang, Wantana Klysubun, Gui-Gen Wang*, Suchinda Sattayaporn, Fei Li, Ya-Wei Cai, Fuchun Zhang, Jie Yu, and Ya Yang*. "Interfacial Electronic Structure Engineering on Molybdenum Sulfide for Robust Dual-pH Hydrogen Evolution", Nature Communications, 2021, 12, 5260.

关键字 纳米发电机；复合；耦合

D15-21

无标记纳米尺度高光谱显微成像技术在纳米功能材料领域的应用

孙琦¹

1. 思拓唯沃（中国）有限公司

D15-22

电活性生物材料和器件及自供能治疗

李琳琳^{1,*}

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences

电刺激能够调控细胞/组织功能，在再生医学、恶性肿瘤治疗等方向具有重要的研究意义和应用价值。如何将电刺激安全、有效递送到生物体系达到治疗目的，是目前该领域发展的重点和难点。我们设计了具有仿生结构和电活性的纳米生物材料和自供能发电器件，发展自功能电刺激对细胞功能、细胞活性氧水平、药物递送等的调控方法，实现在干细胞神经分化、组织再生、恶性肿瘤和感染性疾病治疗等方面的应用。

关键字 自供能，纳米发电机，肿瘤治疗，组织再生

D15-23

高效、高耐久的摩擦纳米发电机用于蓝色能源收集

蒋涛^{1,2}、梁茜^{1,2}、陈鹏飞^{1,2}、张弛^{1,2}、王中林^{1,3,*}

1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所
2. 中国科学院大学
3. 佐治亚理工学院

海洋中蕴含着丰富而清洁的可再生蓝色能源，包括波浪能、潮汐能等。海洋能源若实现大规模商业化利用，将极大缓解人类的能源需求，降低二氧化碳排放，带来能源格局的巨大变化。目前波浪能收集与转化主要依赖于电磁发电机，其对于直接转化低频、无序波浪能量的效率很低，而摩擦纳米发电机恰恰在低

频、高熵能量收集上具有显著优势，提供了波浪能高效开发利用的一种颠覆性技术路径。当前国内外已完成波浪能摩擦纳米发电的原理验证，然而，在波浪能摩擦纳米发电器件输出性能、能量转化效率、耐久性提升及能量管理等方面还需要持续的探索。

于此，我们提出了几种典型的改善波浪能发电器件的效率和耐久性的方法，并研究了发电机及其网络输出能量的有效管理方法，以构建海洋相关的自驱动应用系统。设计了弹簧协助及摆动结构的发电机用来收集低频水波能。首先引入弹簧结构将低频水波运动转化为高频振动，将能量转化效率提高 1.5 倍。然后制备耦合弹簧及多层结构的球形发电机，实现了在水波激励下输出电流和功率的提升。基于球形发电机阵列构建了自驱动水温探测系统，展示了纳米发电机在蓝色能源收集中的应用潜力。之后，设计了摆动结构的发电机用来收集低频水波能，摆动时长达 88 s，显著增强了发电机的输出频率，且空气间隔和柔性介电刷的设计降低了材料的磨损，提高了器件的耐久性和能量转化效率（28.2%）。在此基础上，引入了柔性兔毛和超润滑陶瓷轴承来降低阻力，将触发后的摆动时间延长到 5 分钟，提高了器件耐久性。此外，我们利用兔毛制备了高耐久、低磨损的发电机用于水流能收集，并通过双重电荷补偿策略制备了高输出和耐久的发电机。

接着，进行了发电机及其网络的输出能量管理研究。首先将弹簧结构的多方向水波能收集发电机与能量管理模块集成，对输出能量进行有效管理，实现给超级电容器充电时储存能量提高 100 倍，构建了自驱动水温传感和液位探测/报警系统。随后，将能量管理模块和球形发电机网络集成以构建自驱动的应用系统。经管理后发电网络在负载上输出稳定的直流电压，充电速度提高 96 倍，持续驱动温度计工作，并每 10 秒无线发射信号一次。之后，设计了针对纳米发电机的电荷激励模块，与发电机网络集成后在水波中单球输出电流提高 208 倍，达 25.1 mA，输出功率达 25.8 mW。并且利用该模块对耦合弹簧与摆动结构的发电机网络的输出进行有效管理，实现了完全自驱动的无线信号收发系统，展示了蓝色能源收集的重要应用。

关键字 摩擦纳米发电机，蓝色能源收集，高效率，高耐久性，自驱动系统

D15-24

BNT-BZT/PVDF 复合膜基风能驱动的摩擦纳米发电机及其自驱动系统

赵坤^{1,2,*}、孟靖轲¹、钟明¹、李随心¹、牛云霞¹、刘鸿杰³、顾宾尼⁴、刘铭金⁴、张鼎⁵、孔令斌¹、阙郁伦⁴

1. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室，甘肃 兰州，730050

2. 兰州理工大学

3. 广西大学化学与化工学院，广西 南宁，530004

4. 国立清华大学材料科学与工程学院，台湾 新竹，30013

5. 南开大学材料科学与工程学院，天津，300350

摩擦纳米发电机是以麦克斯韦位移电流为驱动力将分布式、无规则的低频微小机械能有效转化为电能的新型能量收集器。在可穿戴电子器件、移动式电子设备、微纳机器人以及分布式环境传感器等微电子器件的能量供给方面具有巨大的应用潜力，对实现双碳目标具有重要的意义。然而，摩擦纳米发电机相对较低的输出性能和缺乏与之匹配的能量存储器件严重限制了其在日常生活中的大规模应用。基于此，本文使用全固态锂离子电池作为储能器件与可以收集风能的高性能摩擦纳米发电机相结合成功构建了自充电系统。该系统可以有效收集环境中的风能并将其转化为电能后进行存储，能够解决传统便携式移动电源需要外接电源周期性充电的问题。

本文以 $0.94(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3-0.06\text{Ba}(\text{Zr}_{0.25}\text{Ti}_{0.75})\text{O}_3/\text{PVDF}$ 复合材料和 PA 作为匹配摩擦电材料构建了收集风能的高输出性能的摩擦纳米发电机。当风速为 20.6 m/s 时摩擦纳米发电机开路电压和短路电流分别高达 405 V 和 47 μA ，最大输出功率为 10.65 mW。并以 LiNiMnCoO_2 为正极、 NiCo_2S_4 为负极、 $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}/\text{PVDF-HFP}$ 为电解质设计的全固态锂离子电池在 200 次循环后可以保持 51.3 μAh 的放电容量，库仑效率为 98.5%。使用摩擦纳米发电机在 58 min 内可将全固态锂离子电池电压从 0.5 V 充至 3.8 V。而且，构建的自

充电系统可驱动 12 个并联的白色发光二极管连续工作 42 min，且可以驱动商业 pH 计工作 5 s。此项工作为低成本、高性能和高安全性自充电系统的开发及其在新型自驱动微电子器件中的大范围应用提供了参考方案。

关键字 BNT-BZT/PVDF 复合膜；摩擦纳米发电机；全固态锂离子电池；自驱动系统

D15-25

二维铁电存储器件

薛飞^{1,*}

1. 浙江大学杭州国际科创中心

随着人工智能、物联网和大数据的到来，海量数据需要在极短的时间内处理并保存。因为数据不停地穿梭于物理分离的计算与存储单元，给主流的冯诺依曼计算架构带来严峻的速度与能耗挑战。为解决此问题，新的计算范式应运而生，例如类脑计算(Neuromorphic Computing)和存算一体(In-memory Computing)，这些技术能够模拟人类大脑的工作模式，在同一器件中实现计算与存储的完美融合，能有效降低运行功耗并提高计算速度。新兴的二维铁电存储器件，给类脑计算和存算一体的硬件实施，提供了全新的希望，因为它们有出众的极限缩微、多功能传感、超快运行速度等特性。本报告将以层状三硒化二铟铁电材料为范例，介绍我们在二维铁电存储器件的器件物理、极限缩微、新器件结构与功能等方面的持续探索。

关键字 二维铁电、铁电存储、铁电阻变机制、 α - In_2Se_3

D15-26

A biodegradable Silk-based flame-retardant triboelectric nanogenerator for fire warning and GPS positioning

Jinming Ma^{1,*}

1. Hebei Key Laboratory of Nano-biotechnology, Yanshan University

Emerging technologies such as the Internet of Things and artificial intelligence are driving the rapid development of flexible wearable energy and sensor devices. Triboelectric nanogenerator (TENG) can convert distributed high entropy energy from the environment into electrical energy, and they have gained wide attention in the field of flexible/wearable electronics as self-powered micro/nano energy sources and self-powered sensors. Natural silk films have biocompatibility and biodegradability, and flexible TENGs based on silk have been reported, but they suffer from problems such as limited use in extreme environments such as high temperatures. Therefore, improving the stability and flame retardancy of silk films has become the focus of research. Herein, calcium chloride is introduced as a flame retardant to prepare a flame retardant silk fibroin protein film. A silk-based flame retardant TENG (FR-TENG) with single electrode is constructed using SF as the friction layer and Ag NWs as the electrode layer. FR-TENG has high electrical output performance and fatigue resistance, and can be used as micro-nano energy to charge capacitors. Based on FR-TENG, a forest fire alarm and GPS positioning system triggered by frictional electrical signals are constructed, which can quickly and accurately locate the geographical position of trapped people or rescuers, broadening the application of frictional nanogenerators in fire rescue scenarios.

Key words Triboelectric nanogenerator; Flame retardant; Silk; Fire warning

D15-27

摩擦纳米发电机驱动的塑料薄膜基轻量化 EAD 推进器用于多用途推进应用

韩凯¹、骆健俊²、陈剑²、王中林²、麦文杰^{1,*}

1. 暨南大学
2. 北京纳米能源与系统研究所

基于电空气动力学（EAD）理论，高强度电场中运动的离子在与气体中的中性分子碰撞时可产生相应推力，该技术已被证明在推进领域具有巨大的应用潜力且不会产生燃烧排放污染。利用该原理，我们提出了一种简单且易于制作的塑料薄膜基轻量化 EAD 推进器，单个器件仅重 5.44 mg。在 8.5 kV 的电压驱动下，该推进器可产生高达 3.65 m/s 的高速空气流，相应的推力约为 0.68 mN。摩擦纳米发电机（TENG）作为一种极具发展前景的新型能源技术，其高电压输出特性在许多应用场景中都表现出天然优势。通过引入适当的管理电路，我们将不同形式的 EAD 推进器和 TENG 动力组合成不同的推进系统，成功实现了驱动泡沫船只前进、微型飞行器飞行以及磁悬浮地球仪旋转，充分表明此类推进系统在多个领域具有广阔的应用前景。

关键字 摩擦纳米发电机，高电压，电空气动力学，推进器，轻量化

D15-28

自驱动固定翼飞行器翼面湍流失速传感预警系统：DATSS

许子颀¹、曹南颖¹、唐伟¹、王中林^{1,*}

1. 中科院北京纳米能源与系统研究所

湍流失速传感，固定翼飞行器中必备但工艺难度极大的传感单元，在飞行安全中意义重大。由于翼面末端气流分离导致的空气动力学失速，在飞行器安全事故中占比最高。在现有商业化程度较高的失速传感方案中，风标攻角传感与压差传感仍存在着非直接原位监测，后端算法复杂的缺陷；同时较大的体积与质量使得其难以应用于新兴的多功能无人机领域。此外，用于观测翼面湍流程度的引线法，亦存在无数字化量化湍流失速的缺点。基于以上痛点，团队创新使用摩擦纳米发电与压电技术的耦合，开发出了一款自驱动轻质化原位监测翼面气流分离程度的新型失速传感系统（DATSS），该系统实现了对于失速监测的数字化、可视化与阵列化感知。同时，研究者还根据传感系统特征，自主研发了小型微处理系统对于传感数据进行无延时信号分析，实现了直接法原位对飞行器失速的发生进行预警与解除。DATSS 系统在经过风洞测试，CFD 计算流体力学模拟仿真，小型无人机测试论证后，目前已经完成了载人塞斯纳 C172S 飞行器的实飞测试，成功对于飞行器大攻角失速进行了预警与深度判断。未来，DATSS 系统在国产飞行器失速传感解决方案中将扮演着更重要的角色。

关键字 摩擦纳米发电机，压电电子学，失速传感，流体力学

D15-29

接触分离式摩擦纳米发电机的理论边界及优化方法

刘伊娜^{1,*}、陈小平¹

1. 西交利物浦大学

近年来，摩擦纳米发电机（TENGs）作为一种新型的能量转换器，在能量收集和自驱动传感领域展现出巨大潜力。输出能量是评估 TENGs 性能的关键性指标，而 TENGs 的能量与表面电荷密度的平方成正比。因此，增强表面电荷密度成为提升 TENGs 输出性能的首要策略。在材料科学和工程技术领域，已有许多工作致力于提升 TENGs 的表面电荷密度和能量输出。然而，表面电荷密度和能量输出的理论边界及其计算方法尚不明确。在这项工作中，基于接触分离式 TENGs 的平行板电容器模型，以空气击穿为理论极限，建立了接触分离模式 TENGs 表面电荷密度和能量的限制性方程。通过对限制性方程的数学优化，推导出了最大表面电荷密度和最大有效输出能量与 TENGs 的结构和材料因素之间的数学关系。此外，还提出了提高 TENGs 输出性能的优化方法，以 10 μm 硅橡胶作为介质层的优化模型在 2cm 分离距离下可实现 2.85

mC/m² 的表面电荷密度和 1.12 mJ 的能量输出。这项工作为 TENGs 输出性能的理论边界提供了系统的分析和全面的预测，对高性能 TENGs 的设计和优化提供了指导。

D15-30

Interface modulation and structure design of flexible lead-free piezoelectric composites

Qilong Zhang^{1,*}, Zheng Zhou¹, Jing Wang¹, Zhao Zhang¹, Zhaoyue Xia¹

1. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University

Piezoelectric composite thin films have been widely used in the fields of energy collection and self-powered sensing due to their high-voltage electrical properties, mechanical flexibility, and simple and efficient preparation methods. However, designing and preparing lead-free piezoelectric composite films for high-voltage output remains a huge challenge. Here, from the viewpoints of interface modulation and structure design, several piezoelectric composite films such as BT@C-P(VDF-TrFE), Ag/BCZT-PVDF, and porous structure P(VDF-TrFE) were constructed, and their output performance of piezoelectric generators were systematically studied. The results indicated that these special structure composite films can lead to the formation of more polar β phase, resulting in the enhanced piezoelectricity of composites and the boosted output performances of lead-free PENGs. Additionally, the potential applications of lead-free piezoelectric composites in energy harvesting (including harvesting energy from environmental vibration and human motions), self-powered sensing (including detecting physical motions and physiological signals) and human-machine interfaces are also broadly exploited, which enrich the applications of lead-free PENGs.

Key words Lead-free piezoelectric materials; Interface modulation; Structure design; composites; Piezoelectric nanogenerators

D15-31

压电微机电研究进展

董蜀湘^{1,2,*}

1. 深圳大学

2. 北京大学

不同于传统电磁原理的微机电，压电微机电涉及压电、铁电、磁电功能材料与它们的集成，属于材料、物理、电子、与工程跨学科综合性研究领域。本讲座将介绍我们团队在压电微机电领域里开展的开拓性研究工作，包括我们创立的压电超材料与人工模态理论、压电微机电的“磁—弹—电”耦合理论与等效电路方法；介绍压电微马达工作原理、磁电耦合工作原理、以及我们在压电微机电领域的重要发现和重要进步，包括：柔性压电电子与 3D 打印、压电与磁电能量采集、压电微马达，包括发明了世界上最小的压电微马达，具有微纳米分辨率的系列直线压电马达，压电-电磁双机理马达，以及压电微机电在空间领域的重要应用，（成功应用于墨子号卫星激光通讯（2018））。

在国际重要刊物上 Science Advances, EES, Advanced Materials 等发表 SCI 文章 200 余篇;SCI 引用次数 10000 余次；拥有 35 项美国、中国发明专利。曾获美国宾州大学 2000 年材料科学进步一等奖，入选斯坦福全球 2%顶尖科学家排行榜、入选中国高被引学者。

关键字 压电微机电 压电超材料 3D 打印 能量采集 纳米驱动

D15-32

二维半导体材料中的压电电子学和挠曲电电子学

翟俊宜^{1,*}

1. 中科院北京纳米能源与系统研究所

二维材料的超薄层状结构和优异的物理、化学性质为研究压电电子学提供了理想的平台。原子层厚度二维材料中存在压电性的理论预测和实践证明为进一步探索原子尺度上的新物理以及新一代光电子器件应用提供了新的视角。通过压电、半导体特性的耦合,利用二维压电半导体作为研究材料,例如过渡金属二硫化物等,极大地拓展了压电电子学这一重要的研究领域。通过在压电半导体中施加应变产生压电势和压电极化电荷,来调节局部界面区域的能带结构,从而控制界面处载流子的传输。此外,虽然二维二硫化钼中厚度方向没有压电效应和压电电子学效应,但是存在显著的挠曲电电子学效应及挠曲电光电子学效应,我们以机械及光电性能优越的二硫化钼为基础材料,合理并充分利用其理化特质以及声、光、电、磁和机械力等外部因素作用下的界面效应,设计全新结构/架构的二维电子器件,同时可以避免传统场效应晶体管的高功耗和低调制比,以及极大地提升其传感性能及预处理功能。

关键字 压电电子学、挠曲电电子学、二维材料、半导体器件

D15-33

高性能摩擦纳米发电机与摩擦光子学

瞿云龙^{1,*}

1. 香港科技大学（广州）

To provide a sustainable power solution, triboelectric nanogenerator (TENG) has been developed since 2012 for high-efficiency mechanical energy harvesting from the ambient environment. The PI's team has made significant contributions to fundamental studies about the triboelectric effect, discharge, and TENG output characteristics. and Multiple strategies to greatly enhance the output performance of TENG has been demonstrated, such as the high-pressure environment and the liquid-solid interface. On the other hand, the PI's team also proposed and developed the concept of tribophotonics: tribo-charge induced tuning or generation of photons toward self-powered wireless sensing, which can be achieved through tunable liquid lens, liquid crystal, optical switch, tribo-induced electroluminescence (TIEL), and discharge.

D15-34

功能高分子在摩擦纳米发电机中的应用

黄龙彪^{1,*}

1. 深圳大学

Triboelectric nanogenerator (TENG) has attracted intense research interests in recent years for its applicability in portable and wearable electronics. However, for practical applications, the durability and survivability of TENG in complex working environments is a vital issue which must be addressed. We develop various TENGs based on functional polymer materials to satisfy specific application scenarios. A self-healing, flexible, and tailorable TENG is designed as a wearable sensor to monitor human motion based on thermal effect of infrared radiation. To improve the environment resistance, an icephobic and ultrafast self-healing TENG with outstanding non-drying and non-freezing properties is fabricated for energy harvesting and self-powered sensor. To further develop the wide utilization of TENGs, 4D printing technology is introduced to fabricate the self-recovered TENGs, which provide excellent self-recoverability and open a path to fabricate complicated structure.

Key words Triboelectric nanogenerator, Self-healing, Self-recovered, Reliability, Self-powered sensor

D15-35

摩擦纳米发电机的理论模型

邵佳佳^{1,2,*}

1. 北京纳米能源与系统研究所

2. 中国科学院大学

模型反映客观事物的本质。摩擦纳米发电机作为一种将机械能转换为电能的新型能量收集器件，它的理论模型可以反映能量收集与流动的全部过程以及机电能量转换系统的关键特征。本报告将简述位移电流的基本概念、物理意义和准静态近似；重点介绍摩擦纳米发电机的基础理论，包括动生极化项、位移电流的产生与变化规律；数学物理模型、等效电路模型、机电耦合模型、集总事物原则与集总参数理论；输出特性、评价标准与优化原则；机电能量转换系统的建模与动态仿真等关键科学或技术问题；最后介绍在接触起电与接触界面光谱方面的计算工作。尝试分析和完善摩擦纳米发电机的基础理论，为其优化设计和规模化应用提供理论支撑。

关键字 摩擦纳米发电机，位移电流，数学物理模型，机电能量转换、接触起电

D15-36

直流摩擦纳米发电机的材料选择与性能优化

赵志浩¹、王杰^{1,*}

北京纳米能源与系统研究所

随着物联网（IoT）时代的快速发展，对供电系统提出了更高的要求，以支持难以想象的复杂的电子和传感器分布式阵列，这对传统的集中供电系统是一个巨大的挑战。分布式电源系统是解决这一问题的潜在途径，其中摩擦电纳米发电机（TENG）代表了支持分布式电源系统的一组核心技术。传统的 TENG 依靠摩擦起电和静电感应，实现交流（AC）输出。我们通过结合摩擦起电和静电击穿来实现直流 TENG（DC-TENG）。利用不同摩擦材料的基本电学参数、起电性能等，并结合静电击穿的基本原理，提出了适用于直流摩擦纳米发电机的材料选择模型，并根据实际应用需求，提出了基于直流发电机的材料性能评判模型，并通过合理设计直流摩擦纳米发电机的微观电极结构，进一步提高 DC-TENG 的有效电荷密度，通过模型选用合适的摩擦材料可以将有效电荷密度提高到 8.0 mC m^{-2} 以上。

关键字 摩擦纳米发电机，摩擦材料，电荷密度

D15-37

摩擦起电的界面摩擦学设计与应用

王道爱^{1,*}

1. 中国科学院兰州化学物理研究所

摩擦电纳米发电机（TENG）是一种将环境中的机械能转化为电能的新型装置。由于其能量来源范围广、能量转换效率高、应用范围广等特点，已成为能源领域的一个热点。然而，其高内阻、低输出电流和功率密度的特点严重影响了 TENG 的进一步应用，特别是 TENG 收集的是材料界面的摩擦能量，摩擦副的界面接触、抗磨损性能会直接制约器件的最终输出性能和工作寿命。这项工作从摩擦副的界面接触和摩擦学行为的角度，分析了影响固-固、固-液 TENG 的影响因素与制约机制，并提出了通过表面结构和组成设计以及改善界面接触的方法，提高 TENG 输出性能，并通过超润滑设计和添加抗磨材料提高其抗磨损性能和工作寿命，提出了涂层 TENG 的设计策略，为 TENG 的大规模应用提出了解决方案和技术参考。

关键字 摩擦学行为，TENG，界面设计，磨损，润滑

D15-38

聚合物摩擦发电材料与自驱动传感

陈翔宇^{1,*}

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences

报告集中在介绍基于摩擦纳米发电机（TENG）实现的微能源与功能化微纳米系统，着重介绍自供能微纳米系统以及可穿戴智能器件等方向的研究。发展微纳米尺度的能源系统从周围环境中自行收集能量，并且以此实现多功能的自驱动 MEMS 系统，具有重要的实用价值。TENG 是利用接触起电实现基础的面电荷密度,之后通过机械运动中的电容变化产生位移电流来收集环境中散乱的机械能量。我们基于电子云重叠和量子势阱的物理模型，解释了接触起电过程中原子尺度的电子转移现象,揭示了聚合物材料的分子结构和官能团组成对接触起电的作用机制，进而提出了多个调控 TENG 界面性能的工艺和方法，最终实现具有高输出特性的微能源器件。我们基于之前压电陶瓷驱动器的研究，将摩擦纳米发电机（TENG）的研究拓展到以介电弹性体材料，铁电记忆材料，亲疏水可调的介电材料为主的自驱动功能系统等方向，在柔性电子系统、仿生肌肉等领域实现了一系列新颖的应用。

D15-39

基于功能聚合物的智能电子皮肤

刘瑞远^{1,*}1. 苏州大学
待定

D15-40

XXX

付比^{1,*}1. 南方科技大学
待定

D15-41

基于自驱动纳米发电机传感网络的羽毛球运动监测

李丁^{1,*}、王森¹、宁川¹、张佳斌¹、彭晓¹、董凯¹、王中林¹

1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所

运动装备是影响运动员竞技表现的重要因素之一。在物联网时代，将智能传感技术与运动装备相结合就显得非常重要。在这里，我们展示了一种带有自驱动纳米发电机传感网络的（S-TESN）的智能羽毛球球拍。它能实现击球力和位置的实时感测，并实现了羽毛球接触点的统计分布。S-TESN 是基于由多轴绕组方法制作的同轴纳米发电机传感器（S-TENG）。该器件对轻微的接触高度敏感，并且不受弯曲，洗涤和温度变化的影响。这项研究表明，S-TESN 具有低成本，便携性和实用性，有望成为运动员和裁判提供培训指导和实时比赛的辅助工具。这也会对智能运动产生积极的影响。它甚至可能导致羽毛球在将来的在游戏、训练和使用的方式的创新变化。

关键字 智能运动装备，摩擦纳米发电机，自驱动传感网络，羽毛球运动监测

D15-42

可穿戴摩擦电颈部运动传感器

蒲贤洁^{1,*}

1. 重庆大学

颈部运动信息的采集在医疗保健与人机交互界面中有着重要的应用价值。本文基于摩擦纳米发电机，

设计并制作了柔性可穿戴、自驱动、低成本的颈部运动传感器。由于摩擦纳米发电机的原理是摩擦起电与静电感应的耦合，外部电场的不规则变化会严重影响输出信号。这项工作着重研究了人体皮肤电势对穿戴式摩擦电传感器的影响及其屏蔽，有效地提高了信噪比，进一步提高传感器的识别率与稳定性，构建了基于卷积神经网络的深度学习模型，识别 11 类颈部运动的平均识别率达到了 92.63%。

D15-43

Highly Tunable Piezoelectricity at a Freestanding Ferroelectric Membrane

Lu Han ^{1,*}, Xinrui Yang ¹, Yingzhuo Lun ², Jiawang Hong ², Yuefeng Nie ¹

1. Nanjing University

2. Beijing Institute of Technology

The combination of strain and electrostatic engineering in ferroelectric domains offers opportunity for enhanced piezoelectricity^[1-3]. However, substrate clamping is a dominant effect during domain formation^[4], which also limits the electromechanical response and often leaves electrostatics to play a relatively minor role. Freestanding membranes, which are free of substrate constraints, enable adjustment between elastic and electrostatic forces^[5,6], giving rise to dramatically enhanced or tunable functionalities. Here, a temperature-based approach to tune the longitudinal piezoelectricity at a freestanding PbTiO₃ membrane is demonstrated, which arises from the rearrangement of ferroelectric domains. Significantly, c/a domain structure has an enhanced piezoelectric coefficient of $\times 2.5$ compared with typical c domain PbTiO₃ and giant piezoelectricity tunability (up to thirty times) can be achieved^[7]. This work presents a strategy to greatly manipulate the piezoelectricity in freestanding ferroelectric membranes, and we expect the low-dimensional materials with highly-tunable piezoelectricity reported here to permit applications in soft actuators and vibration sensors.

References

- [1] Zeches, R. J. et al. *Science* **326**, 977 (2009).
- [2] Qiu, C. et al. *Nature* **577**, 350 (2020).
- [3] Damodaran, A. R. et al. *Adv. Mater.* **29**, 1702069 (2017).
- [4] Nagarajan, V. et al. *Nat. Mater.* **2**, 43 (2003).
- [5] Li, Y. et al. *Adv. Mater.* **34**, 2106826 (2022).
- [6] Han, L. et al. *Nature* **603**, 63 (2022).
- [7] Han, L. et al. *in preparation*.

Key words piezoelectricity; freestanding oxide membranes; molecular beam epitaxy; ferroelectricity; piezotronics

D15-44

基于摩擦电场调节的可穿戴式人体汗液监测传感器

雷浩 ¹、申浩 ¹、赵春 ¹、孙旭辉 ¹、文震 ^{1,*}

1. 西交利物浦大学

可穿戴汗液传感器可以分析汗液中丰富的代谢产物和生理信息，实时反映佩戴者的健康状况。实现对汗滴的主动运动控制，对于具有多个分析室的汗液多参数并行监测装置的开发和研究具有重要意义。本工作通过结合介质上的电润湿(EWOD)技术和摩擦电纳米发电机(TENG)，演示了一个基于可穿戴液滴的人体汗液监测平台(WSMP)。它能通过介电润湿效应在不同的腔室中收集和运输汗滴，最终与 pH 值指示器发生融合和反应。同时，这也是一种实现数字微流控技术可穿戴化的有效方式。通过建立 WSMP 的等效机电模型，得到 TENG 的开路电压与施加在 EWOD 器件上工作电压之间的数值关系。TENG 产生的高压电场

可以改变固液界面的润湿性，实现对液滴运动的控制。在 5kV 的摩擦电压下，接触角的变化可达到去离子水的 50%，并满足液滴驱动的需要。通过主动控制液滴的运动，可以实现液滴的驱动、融合和显色反应。最后，三位佩戴者完成了 WSMP 的佩戴实验并在运动中测得汗液的 pH 值。

关键字 摩擦纳米发电机； 汗液检测； 介电润湿； 可穿戴传感器

D15-45

用于协同收集雨滴能和太阳能的多层摩擦纳米发电机及其能量转换分析

郑阳¹、李潇逸^{1,*}

1. 中国海洋大学

Triboelectric nanogenerator (TENG) offers an excellent potential for the conversion of mechanical energy from rain into electricity. However, a high-performance TENG is yet to be achieved because a quantitative analysis method for the energy conversion process is still lacking. Herein, we present a quantitative analysis method, termed the kinetic energy calculation and current integration (KECCI) method, which significantly improves our understanding of the energy conversion process. A high-performance TENG is developed by systematically optimizing a biomimetic surface structure and instant switch design, with 1.25 mA current, 150 V voltage, and energy conversion efficiency of 24.89 %. Furthermore, multi-layered TENGs are designed and integrated with photovoltaics, achieving all-weather energy harvesting. Our work presents a validated theoretical basis that will guide further development of TENGs and promote the commercialization of hybrid TENG systems for all-weather applications.

Key words triboelectric nanogenerators, energy conversion analysis, superhydrophobicity, solar cell, hybrid energy harvesting

D15-46

基于可编程超材料设计的聚偏氟乙烯基电子皮肤 3D 打印策略

裴浩然¹、陈英红^{1,*}、荆晶晶¹、郭佳俊¹

1. 高分子材料工程国家重点实验室，四川大学高分子研究所

传感器能源供给问题是发展多功能电子产品的技术瓶颈。压电材料可将环境中富余的机械能转换为电能，使电子产品摆脱对传统电池的依赖，是加快产业转型升级的关键技术支撑。然而受材料模量和复杂结构的几何约束限制，常规压电制件环境自适应能力差，受力塑性变形显著，严重制约其在可穿戴柔性电子领域发展。因此迫切需要研制具有高机电耦合特性、高灵敏度和环境适应性的多功能压电复合材料及其器件制品。超材料是人工构建的周期性排列单元结构组成的新型复合结构，依靠精确的几何构型、方向和排列组合会赋予常规材料所不具备的特性，打破了人类对传统材料属性的认知局限，为解决上述技术瓶颈和难题提供了思路。随着先进 3D 打印技术的快速发展，多种功能超材料已被陆续报道，其中机械超材料可实现一系列反常规力学特性如负泊松比、零刚度、超低杨氏模量，已成为促进特异力学与多学科交融的催化剂。结合机械超材料设计可精准调控材料的应力应变行为如具有负泊松比的拉伸膨胀特性，实现压电传感器件对皮肤等复杂曲面的良好贴合和自适应，有望解决常规可穿戴传感器严重限制皮肤自由运动的缺陷，提高传感器的灵敏度和稳定性。

本文提出了一种结合固相剪切碾磨和 3D 打印技术制备基于可编程超材料设计的聚偏氟乙烯基电子皮肤新策略。研究了离子盐-蒙脱土模板作用下 PVDF 电活性晶自组装行为，利用熔融沉积成型 3D 打印取向技术诱导 MMT 填料模板定向排列，改善了复合材料压缩塑性形变，并实现平行于应力方向的界面锁定极化。进一步构建蛇形机械超材料单元的周期性排列结构精准调控材料的应力应变行为，结果表明超材料单元的侧向屈曲和扩张行为赋予了 3D 打印压电器件反常规的负泊松比力学特性，即器件在拉伸应变下横纵

向同时发生膨胀,实现压电器件对皮肤等复杂曲面的自适应,有望解决常规穿戴式传感器严重限制皮肤自由运动的缺陷。通过揭示器件受蛇形超材料单元操纵的机电耦合理论,开发了具备可编程设计、自决策等特性的先进压电纳米发电机,经线性马达驱动在 $0.6\text{ G}\Omega$ 负载电阻下输出功率可达 $0.7\text{ }\mu\text{W}$ 。研制的超材料电子皮肤极大拓展了 PVDF 基压电材料的设计空间,展现了运动监测、手语传译等一系列智能可穿戴应用前景。本文得到国家自然科学基金(51933007)、成都市国际科技合作项目(2021-GH03-00009-HZ)和四川省青年科技创新团队计划项目(22CXTD0019)的资助。

关键字 聚偏氟乙烯, 超材料, 压电纳米发电机, 3D 打印

D15-47

单层 MXene 的压电性能研究及相关器件的开发

江诚鸣^{1,*}

1. 大连理工大学

二维材料由于其广阔的应用前景,其压电性能已被广泛研究。MXene 是著名的 2D 材料成员之一,被预测为具有非中心对称晶格结构的高定向压电材料。我们展示单层 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 压电响应的实验研究,表明循环应变激发稳定的振荡压电电压和电流输出。MXene 表面的官能团破坏晶格结构的逆对称性,从而具有压电性能。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 片材扶手椅方向的压电性在 1.08% 拉伸应变下显示出 0.3 nA 的固有电流输出,对应于 6.5 mW/m^2 的功率密度和 11.15% 的转换效率,均高于先前报道的 2D 材料。此外, MXene 的理论计算解释了多原子结构和表面官能团之间压电极化的起源。压电 MXene 的发现可以为理解和应用 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 为纳米器件和可拉伸电子器件提供动力奠定基础。

关键字 压电, 二维材料, MXene, 压电电子

D15-48

高效雨滴太阳能电池的界面工程

谢凌婕^{1,2}、刘伊娜^{1,*}、文震²、孙旭辉²

1. 西交利物浦大学

2. 苏州大学

为了克服多年传统电磁发电机体积大、低频和难以与其他能源收集装置高效复合的困境,摩擦纳米发电机(TENG)提供了解决方案,其有利于收集雨水机械能,为实现多能量共收集的新型雨水太阳能电池提供了切实可行的技术方案。然而,基于 TENG 的雨水能量收集装置的自身结构和工作机制问题,雨滴能量收集效率低是阻碍雨滴太阳能电池走向实际应用的关键。本工作提出了一种基于 MoO_3 /接触电极的摩擦纳米发电机(MT-TENG),具有较高的雨滴能量转换效率,并通过共用电极与钙钛矿太阳能电池集成为高效雨滴太阳能电池。摩擦起电层与电极之间构建具有高介电常数和宽带隙的 MoO_3 电荷阻挡层的界面工程,基于 MoO_3 的 TENG 增加了表面电荷密度。同时,固液界面的固-液接触电极的表面工程使得输出电荷增加 101.1 倍。通过调节水滴参数,模拟实际应用场景,雨滴输出功率和机械能转换效率分别可达到 0.68 mW 和 12.49%。此外,由于 MT-TENG 的高透过率,钙钛矿太阳能电池仍然可以保持 19.38% 的高光伏功率转换效率(PCE)。通过共用电极电路设计,雨滴太阳能电池在雨天和晴天都能持续供电,2.2 μF 电容充电至 5 V 仅需 175 s。本工作为雨滴发电太阳能电池的结构优化和性能提升开拓了新思路,对未来可再生能源领域的发展有着重要意义。

关键字 雨滴能量、钙钛矿太阳能电池、摩擦纳米发电机、电荷阻挡层

D15-49

基于静电击穿的直流摩擦纳米发电机

王杰^{1,*}

1. 北京纳米能源与系统研究所

随着物联网时代的快速发展，其复杂的分布式电子器件和传感器阵列对供电系统提出了更高的要求，也对传统的集中供电系统提出了极大的挑战。分布式电源供给系统是解决这一问题一个潜在途径，作为分布式电源供给系统的一种核心技术，摩擦纳米发电机(TENG)在最近几年受到了广泛的关注^[1-3]。传统的 TENG 基于摩擦起电和静电感应原理，通常提供交流(AC)输出。近期，我们团队利用摩擦起电与静电击穿效应，实现了直流输出的 TENG (DC-TENG)^[4]。与传统的 AC-TENG 相比，DC-TENG 具有较高的电荷密度，可以直接驱动电子器件，避免了传统 AC-TENG 需要整流桥和能量存储单元转化为恒流才能驱动电子器件，同时，DC-TENG 避免了静电感应式 AC-TENG 的空气击穿问题和摩擦介质层击穿问题，有望使 TENG 的性能进一步提升。这里将简要介绍 DC-TENG 的基本原理，讨论提高其输出性能的方法^[5-6]，并对其潜在的应用前景进行简要评述。

参考文献：

1. J. Wang, et al. Nature Communications 7, 12744 (2016).
2. J. Wang, et al. Nature Communications 8, 88 (2017).
3. D. Liu, et al. Nature Communications DOI:10.1038/s41467-022-33766-z.
4. D. Liu et al. Science Advances 5, eaav6437 (2019).
5. Z. Zhao, et al. Nature Communications 11, 6186 (2020).
6. Z. Zhao, et al. Nature Communications 12, 4686 (2021).

D15-50**基于摩擦纳米发电机的自驱动电卡制冷/制热研究**黎家余¹、万玲玉^{1,*}

1. 广西大学

随着全球能源危机的加剧，不依赖传统能源供给的新型制冷或制热技术对于现代社会实现能源节约和减少排放具有重要意义。近年来，摩擦纳米发电机（TENG）在收集广泛分布的低质量高熵能源方面展现了独特的优势，成为发展新型自供电器件的极具潜力技术。在本工作中，我们将 TENG 和铁电陶瓷的电卡效应相结合，成功实现了自驱动的电卡制冷/制热。我们制备了在室温下具有高电卡效应（EC）以及高热量捕获性能的 0.1 PbTiO₃-0.9 PbSc_{0.5}Ta_{0.5}O₃(PSTT)铁电功能陶瓷。在 30 kV/cm 的电场以及 1 赫兹的测试频率下，其电卡性能（ ΔT ）达到 2.43 K，能量捕获性能达到 0.463 J/cm³。通过接触分离模式的 TENG 收集环境中的机械能转化为电能，再通过后端电路管理向 12 片 PSTT 陶瓷施加或者释放电场以激发铁电功能材料的电卡效应，实现了双向的温变功能。在 PSTT 与实验空间体积比为 0.433% 的条件下，5.5 min 内实现了 0.54 K 的温度变化，其能量转换效率达到 10.926%。这为开发基于 EC 效应的小型化自供电固态制冷/制热装置提供了新的技术方案，具有性能高、使用方便、零排放等优点，有望在不同领域得到广泛应用。

关键字 TENG；自驱动；电卡效应；制冷；制热

D15-51**ZnO 基光电器件的设计与压电光电子学效应调控**郑海务^{1,*}、王建涛¹、张远征¹、周炎¹

1. 河南大学物理与电子学院

第三代半导体由于其出色的光电性能得到了广泛的关注，其中以 ZnO 等为代表的纤锌矿结构半导体材料，由于在 C 轴方向具有不对称结构，可在半导体内部诱导出压电偶极子。将 ZnO 等半导体材料的压电

特性与其光激发、半导体特性耦合产生了新的研究领域，即压电电子学与压电光电子学，可用于显著改善半导体光电器件的性能。

本次报告的主要内容如下：(1) 设计并制备 BLFO/ZnO 异质结，通过压电光电子学效应与铁电极化进行耦合，显著改善了异质结的输出性能：Voc 提高了 8.4%，Jsc 提高了 54.6%。响应时间和恢复时间分别缩短 60%和 31%。进一步的研究了压电光电子学效应与铁电极化的调控机制，通过 COMSOL 计算进行了相关验证。(2) 制备了基于 ZnO 薄膜的柔性 PN 结，在柔性硅片衬底上通过磁控溅射生长了一层具有择优取向的 ZnO 薄膜，形成柔性的 Si/ZnO 薄膜异质结。研究了不同方向应变下压电光电子学效应对于异质结的调控作用。在施加压缩、拉伸应变下，响应度分别提高、降低了 50%、29.3%，探测率分别提高、降低了 35%、28.1%。(3) 通过磁控溅射法在 Mica 衬底上依次沉积 ITO 电极、ZnO 和 a-Ga₂O₃ 薄膜，构建了柔性 a-Ga₂O₃/ZnO 薄膜异质结光电探测器，在 265 nm 光照和 0.5 V 偏压下，相比于无应变状态，在-0.164% 的压缩应变下异质结的响应度和探测率分别提高了 67.7%和 66.8%，达到了 12.19 A/W 和 4.71×10¹¹ Jones，探究了 a-Ga₂O₃/ZnO 异质结在不同波长下光响应的工作机理。

参考文献：

- (1) Y.Z. Zhang, H.W. Zheng, X.F. Wang, Zhong Lin Wang, et al., ACS Nano, 14(2020)10723
- (2) Y. Zhou, H.W. Zheng, Zhong Lin Wang, et al., Appl. Phys. Lett., 119(2021)121104
- (3) J.T. Wang, Y.J. Zhang, H.W. Zheng, et al., Nanoscale, 15(2023)7068

关键字 ZnO, 光电器件, 压电光电子学效应, 异质结, 性能调控

D15-52

新型 GaN 基微纳结构及其光电器件

王幸福^{1,*}、黎佩珊¹、李文凤¹

1. 华南师范大学

III族氮化物具有可调的直接带隙、高击穿电场、高电子饱和速率以及优异的抗辐射能力，已被广泛应用到各种光电子器件中。过去十多年来，极化耦合对体材料器件的调控和优化已经取得显著的突破。近年来，随着器件集成化的不断发展，微纳结构和器件的研究成为了宽禁带半导体领域一个新的热点。由于具有低几何维度、大比表面积、优异的应变承受度和高度受限的声子自由程等特性，使其不仅成为探究极化耦合和光电调控微观机制的理想载体，同时有利于研制宽禁带半导体新型微纳光电器件。总之，低维宽禁带半导体极化耦合及光电调控研究，是当前纳米科学领域、宽禁带半导体器件领域的热点之一；为发现极化耦合在宽禁带半导体的新机制、新现象提供了有利条件；对研制新型功能化宽禁带半导体光电器件具有重要指导意义。本报告介绍一种新方法，基于外延剥离工艺制备III族氮化物微/纳米结构（GaN、AlGaN/AlN/GaN、InGaN/GaN MQW 等），在此基础上，进一步介绍III族氮化物微/纳米结构中半导体效应与压电极化效应的耦合作用。

关键字 氮化镓；纳米线；纳米膜；光电器件

D15-53

高性能摩擦纳米发电机及自驱动智能系统

骆健俊^{1,*}

1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所

物联网是信息科技产业的第三次革命，其基础组成部分是分布广泛的传感网络。目前，传感器单元通常由电池供电，面临着寿命短、维护成本高、环境污染等问题。作为一种新型的机械能收集和自驱动传感技术，摩擦纳米发电机的发明为物联网的发展提供了新的技术方案。而进一步提升摩擦纳米发电机的输出功率和耐久性，是实现其实用化的关键。本报告将讨论从材料改性和结构设计角度出发，围绕高性能摩

擦纳米发电机的构建，及其在自驱动智能系统中的应用开展的一系列研究探索。

D15-54

柔性摩擦电传感器

文震^{1,*}

1. 苏州大学

基于摩擦纳米发电效应的新一代自供电传感器能够通过分析电输出信号获得机械输入的信息，具备灵敏度高、自驱动等独特优势，近年来在柔性压力传感器领域引起了广泛关注。但因传统的摩擦电传感器受材料结构限制及内建电场的影响，仍存在无法同时实现高灵敏度和宽检测域、输出信号稳定性和重复性较差等问题。在本报告中，我将系统的介绍我们团队在基于纳米摩擦发电技术的传感材料、器件及优化机制方面的研究进展，特别是将全面分析柔性摩擦电压力传感性能优化的理论基础、影响机制和技术路径，通过构建界面电场对摩擦电荷行为进行有效调控，显著提高了器件稳定性和重复性，最后我将总结摩擦电压力传感器在不同压力范围和工作频率下的典型应用及未来前景。

关键字 摩擦纳米发电机，压力传感，性能提升，界面电场，典型应用

D15-55

纳米发电机与穿戴式传感

唐伟^{1,*}

1. 北京纳米能源与系统研究所

穿戴式智能装备飞速发展，可针对个人的运动健康进行实时监测，其核心技术之一即为传感器。现有的穿戴式运动传感器包括基于惯性传感原理的硅基 MEMS 传感器，其工艺成熟、性能稳定，但在人体应用中，需要解决贴附性和延展性等问题。随着新兴的信息与材料技术的交叉融合，柔性传感器件迅速发展，包括基于电阻、电容原理的传感单元，基于压电、摩擦电原理的主动传感器件等。报告将基于纳米发电机的主动式传感技术，介绍如何发展具有高准确性和稳定性的穿戴式运动传感器件与系统。

D15-56

Interactive Neuromorphic Synaptic Devices and Systems

孙其君^{1,*}

1. 中科院北京纳米能源与系统研究所

This talk will mainly cover the significant progress concerning on artificial synapses correlated with mechanical, optical, pressure and strain trigger-signals. Based on our researches, “bioinspired interactive neuromorphic device” will be the core in this presentation. This talk will start from the principle of neurosynaptic devices activated by different sensing signals and introduce the influence of external signals on synaptic plasticity. It will also introduce the research progress of interactive neuromorphic synaptic devices/systems inspired by pressure, touch, displacement, light, heat, and mixed signals, and look forward to the future applications of interactive neuromorphic synaptic devices/systems. The interactive neuromorphic synaptic device will involve electronic devices, neuromorphic computation, sensors, and human-machine interactions, which is highly promising for revolutionary artificial synapse and neuromorphic systems.

Key words neuromorphic transistors, artificial synapse, triboelectric potential, tribotronics, mechanoplastic

D15-57

液固摩擦起电中电子转移的自旋选择性

林世权¹、王中林^{1,*}

1. 北京纳米能源与系统研究所

电子转移已被证实是液固界面接触起电过程中的主要载流子。然而，电子自旋在 CE 中的作用还有待研究。本报告主要介绍在磁场中不同液体和铁磁性固体之间的摩擦起电，重点关注溶解氧分子对液-固摩擦起电的贡献。结果表明，磁场促进了含氧液体与固体界面的电子转移。此外，磁场诱导的电子转移随液体的氧浓度增加而增加，在温度升高时减少。结果表明液体-固体摩擦起电过程中存在自旋选择的电子转移。由于塞曼相互作用，外加磁场可以调节含氧液体和铁磁固体界面上自由基对的自旋转换，促进电子转移。基于自由基对机制(RPM)，我们进一步提出了液固摩擦起电自旋选择电子转移模型，其中 HO_2 分子和来自铁磁性固体的自由未配对电子被认为是自由基对。 $[\text{HO}_2\bullet\bullet\text{e}^-]$ 对的自旋转换受磁场的影响，使得液-固摩擦起电对磁场敏感。

D15-58

柔性微纳智能感知器件与系统

化麒麟^{1,*}

1. 北京理工大学

待定

D15-59

面向人体舒适性管理的自驱动电子纺织品

龚维^{1,*}

1. 安徽农业大学

Electronic textiles, inherited with the wearability of conventional clothes, are deemed fundamental for emerging wearable electronics, particularly in the Internet of Things era. However, the electronic waste produced by electronic textiles will further exacerbate the severe pollution in traditional textiles. Here, we develop a large-scale green electronic textile using renewable bio-based polylactic acid and sustainable eutectic gallium-indium alloys. The mass loss and performance change rates of the reconstituted green electronic textiles are all below 5.4% after going through the full-cycle recycling procedure. This green electronic textile delivers high physiological comfort (including electronic comfort and thermal-moisture comfort), enables wireless power supply (without constraints by e.g. wires and ports), has two orders of magnitude better air and moisture permeability than the body requires and can lower skin temperature by 5.2°C.

D15-60

基于快速降解的柔性多孔木材的柔性摩擦纳米发电传感器用于运动监测

毕胜¹、陈强强¹、高不寒¹、陈路华¹、贺征然²、江诚鸣^{1,*}

1. 大连理工大学

2. 阿拉巴马大学

Flexible self-power triboelectric generators (TENGs) have attracted worldwide attention in the fields of optoelectronic systems, communication and biomedical diagnostics due to its outstanding energy collection capacity and high output potential. Wood is an ideal material for construction of high performance TENG. Herein,

a porous wood based flexible triboelectric sensor (PWFTS) as a wearable motion testing system with ultra-large folding curvature and extreme high stability for real-time body motion monitoring is presented. With a over 180° curving angle, the output power of the PWFTS from porous wood is more than 200% compared with that from natural wood. Moreover, a rapid degradation of as low as 36h with extremely reliable repeatability and stability leads to an ideal candidate for wearable devices. The enhancement of such PWFTS may open up opportunities in innovative applications in various optoelectronic devices and flexible integrated systems.

Key words Porous wood; Flexible device; Wearable; Triboelectric nanogenerator; Degradable.

D15-61

挠曲电-电耦合效应增强的 Si 基半导体器件

郭迪¹、翟俊宜^{1,*}

1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所

在可调谐电子、人机界面和微/纳机电系统中，实现机械触发和当前硅技术之间的自适应和无缝交互具有较高的挑战性。压电电子学被认为是应力/应变对电子传输调控的有效机电耦合。然而，这种压电效应受限于非中心对称半导体和特定方向。针对中心对称半导体硅的机电交互需求，我们开发了 Si 基挠曲电电子学晶体管（SFT），它可以创新地将机械驱动转换为电控制信号，并直接实现硅基机电功能。利用 Si 中的应变梯度诱导的挠曲电极化场作为“门控”，可以对宏观硅基晶体管中的金属-半导体界面肖特基势垒的高度和 SFT 的沟道宽度进行大幅调制，进而实现载流子输运的调控；并且，在不同的受力模式下具有特定的可调谐电子输运特性。基于此，进一步开发了硅基触觉感知系统，根据器件在不同调控模式下特定的电学输运特性能够识别触觉感知力的位置。基于 SFT 的应变传感器具有 2189 的高应变灵敏度（Gauge factor, GF），比大多数压阻/压电纳米器件（2~2000）大得多。这些发现不仅在硅基电子器件中实现了具有高灵敏度的机电交互作用，也是压电电子学在硅基电子中的进一步拓展，同时对半导体挠曲电效应提供了深入的认识，对构建下一代硅基机电纳米器件和纳米系统的发展具有重要意义。

关键字 压电电子学，挠曲电电子学，应变梯度，肖特基势垒，机电交互

D15-62

多功能水凝胶在摩擦纳米发电机及传感应用研究

王卓¹、李琳琳^{1,*}

1. 北京纳米能源与系统研究所

近年来，柔性可穿戴电子器件的快速发展促进了其在运动监测、医疗康复和人工智能等领域的蓬勃发展。为了适应多种应用场景需求，开发功能性的柔性电子器件成为目前的研究热点。导电水凝胶因其优异的柔性和可拉伸性能、良好的生物兼容性等被认为是理想的柔性可拉伸电子器件材料。鉴于此，我们设计了具有非对称结构的压电水凝胶材料，在此基础上制备纳米发电机，通过压电和摩擦电的耦合实现了高灵敏度、自供能的生物传感^[1]。为了提高电极与基底之间界面传输和粘附，开发了自粘附性水凝胶材料，在此基础上构建的摩擦纳米传感器实现了可靠、高灵敏度、多模式自驱动传感。此外，我们还发展了一套基于自驱动能量转换与能量收集的自供能系统^[2]，为后续柔性可植入自供能系统提供了新的研究思路。

参考文献

1. Zhuo Wang, Zhirong Liu, Gengrui Zhao, Zichao Zhang, Xinyang Zhao, Xingyi Wan, Yalong Zhang, Zhong Lin Wang*, Linlin Li*. ACS Nano 2022, 16, 1, 1661–1670
2. Zhuo Wang #, Shuncheng Yao #, Shaobo Wang, Zhirong Liu, Xingyi Wan, Quanhong Hu, Yunchao Zhao, Cheng Xiong, Linlin Li*, Chemical Engineering Journal. 2023, 463, 142427.

关键字 水凝胶，摩擦纳米发电机，自驱动传感

D15-63

高性能柔性压光光控晶体管研究

毕胜^{1,*}

1. 大连理工大学

压电光电效应在光电系统、可延展光学处理、生物医学诊断和通信等领域具有潜在的革命性应用。本文报道了一种新型结构器件，双压电光电晶体管（DPPT），基于压电反转结构有机发光二极管（OLED）作为栅极控制，压电纳米线阵列作为电荷传输通道，通过压电光电效应在刺激栅电极和金属-半导体-金属通道中实现了光电性能的显著提高。系统地分析了在 OLED 栅极和纳米线沟道中垂直和水平生长的 c 向 ZnO 纳米线在不同弯曲/应变方向和弯曲程度下的电子产生和电场分布。在机械变形条件下，压电光电晶体管的通断电流比为 106，是无变形条件下的 80 多倍。利用压电-光电效应的集成 DPPTs 的增强，可能为各种光电器件和柔性集成系统的创新应用开辟机会。

D15-64

基于 MXene/TiO₂ 的电荷捕获-阻挡层以实现摩擦纳米发电机的电荷调控陈小平^{1,*}

1. 西交利物浦大学

由于界面电场的存在，摩擦纳米发电机（TENG）的表面电荷向空气或摩擦材料内部扩散，因为电荷复合而导致电荷衰减。因此，除了创造更多的摩擦电荷，对摩擦电荷的存储及调控对提高 TENG 的性能输出同样至关重要。在本研究中，通过二维材料 MXene 的原位部分氧化制备 MXene/TiO₂ 复合溶液，作为摩擦纳米发电机的介质层材料，选用混合纤维素膜（MCE）作为负摩擦层，利用抽滤的方法将 MXene/TiO₂ 附着在 MCE 膜上，作为负摩擦层与底部电极之间的中间层，形成基于 MXene/TiO₂ 中间层的 TENG。MXene 纳米片的表面官能团以及 TiO₂ 纳米颗粒的氧空位提供了丰富的电子陷阱位点，可以有效俘获来自负摩擦层向材料内部扩散的电子；同时，本研究从电子能级的理论角度验证了介质层对摩擦电荷的捕获-贮存机制，MXene/TiO₂ 复合膜的极化效应导致能带弯曲，进一步阻碍自由电子漂移到底部电极，降低由于界面电场而导致的电荷衰减。优化后的 TENG 可实现电荷密度 128 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ ，平均功率密度 73.78 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ 和 63.78 $\mu\text{W}/\text{g}$ 的电学输出，能量转换效率达到 34.81%。此外，本研究还构建了电荷衰减模型，并进行了长时程的电荷衰减测试，优化后的 TENG 可以实现电荷密度为 80 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ 的电荷动态平衡。这项工作从电荷调控的角度出发，在材料科学和结构设计上为提升 TENG 的性能提供了新的见解。

关键字 摩擦起电，纳米发电机，极化，电荷存储，电荷衰减

D15-P001**A Self-powered Non-contact Triboelectric Nanogenerator Enhanced by MXene Nanoparticles for Intelligent Vehicle**Zhaoyang Wang ^{1,*}, Cong Zhao ¹, Yawei Wang ¹, Zheng Tan ³, Qingyu Chen ², Jianing Ren ¹, Minyi Xu ¹

1. Dalian Maritime University

2. Information Science and Technology College, Dalian Maritime University

3. Transportation Engineering College, Dalian Maritime University

Intelligent Vehicle has provided a promising way to construct the intelligent mobility and society in the future. The intelligent vehicle can perform the task of environmental perception, driving perception and information transmission, which aims to make the motoring much safer and more energy efficiency. The intelligent vehicle relies on the reliable sensors to help to automatically understand the scene and make the decision through perceiving the surroundings. Herein, we proposed a self-powered non-contact triboelectric nanogenerator (SNC-TENG) for the perceiving of the smart vehicle via the effect of the electrostatic induction. The MXene/silicone composite layer serves as the dielectric layer of the SNC-TENG. The unique designed structure enables the SNC-TENG to simultaneously possess the merits of large-scalability, structural-reliability and flexibility. The silicone rubber has been widely used as the dielectric material of the TENGs due to the high flexibility and electronegativity. Mxene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) has been proved a popular triboelectric material for TENG applications due to its high electronegativity, good conductivity, and high charge capture ability, which can greatly improve the output performance of TENG. The scanning electron microscopy (SEM) of the Mxene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) nanoparticle which exhibits the multilayer structure. The incorporated MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) nanoparticles enhance the surface charge density resulting from the improvement of the electron trapping capacity. The mechanism is discussed in detail in this work. The outputs of the SNC-TENG dependent on the distance, frequency, moving increment and area are systematically investigated. And the experimental result reveals the voltage output of the SNC-TENG is related to the electro-positivity of the objective materials. Specially, as the volunteer walks through the sensor, the real-time voltage of the SNC-TENG can reach 3.5 V, revealing its potential in practical application. Due to the advantages in all aspects, the SNC-TENG is successfully demonstrated in various application on the intelligent vehicles. Last, the SNC-TENG is attached in the actual vehicle to detect the approaching person, revealing its potential in practical application. It is believed that the designed SNC-TENG, as the medium of the information interaction between the vehicle and surrounding environment, will meet the wide application fields of the intelligent vehicles.

Key words Triboelectric nanogenerators; non-contact perception; self-powered sensors; MXenes; smart vehicles

D15-P002**Preparation and performance study of PDMS nanofibre-based flexible triboelectric nanogenerator**Qiran Zhang ^{1,*}, Tifeng Jiao ¹, Jinming Ma ¹

1. Yanshan University

As an energy conversion technology, triboelectric nanogenerators (TENG) has opened up new areas of high entropy energy applications, and has been widely researched in multidisciplinary interdisciplinary fields such as the Internet of Things, human-computer interaction, blue energy and health care. However, flexible TENG breaks through the barriers of traditional energy devices with rigid structures, providing new ideas for the energy supply

of flexible wearable electronic devices as micro/nano energy sources and self-powered sensors. The development of high-performance TENG with stretchability and breathability is of great importance for the development of flexible wearable electronics. Herein, polydimethylsiloxane (PDMS) nanofiber film is designed by coaxial electrostatic spinning method, which has good transparency, breathability, and stretchable properties. PDMS nanofibre film as negative triboelectric layer, poly- ϵ -caprolactone (PCL) film also designed by electrostatic spinning method as positive triboelectric layer material, and sprayed silver nanowires as electrode to construct a single electrode triboelectric nanogenerator (P-TENG) with a power density of 0.39 W/m^2 , which can successfully charge commercial capacitors and drive electronic watches as a wearable energy device. Therefore, the stretchable TENG with good breathability, providing another approach for the widespread application of TENG based on PDMS in the field of intelligent wearables.

Key words Triboelectric nanogenerator; PDMS; Stretchable; Breathability

D15-P003

防冻可拉伸纤维素/MXene 有机水凝胶的制备及自供电传感应用研究

周洁¹、宋飞^{1,*}

1. 四川大学化学学院环保型高分子材料国家地方联合工程实验室

探索在低温环境中保留高导电性和高强度的可拉伸水凝胶材料，对于可在极端环境下应用的柔性自供电传感器至关重要。在此，我们制备了一种具有高强度和优异导电性的可拉伸纤维素纳米纤维/MXene 有机水凝胶(CMPG)。该有机水凝胶在 20 和 -20 °C 温度下的电导率分别为 8.7 和 6.2 S/m，抗拉强度为 2.6 和 1.8 MPa。通过硅橡胶封装构建了柔性可拉伸的 CMPG 摩擦纳米发电机(CMPG-TENG)，在 -20 °C 可产生 82 V 的电压和 0.8 μA 的电流输出，可持续工作超过 15000 次循环，展现出高稳定性。基于机械力与电压的依赖关系，结合蓝牙无线传输设备，拓展了 CMPG-TENG 在极端环境下(-35 °C)监测机器手工作状态的应用。该研究为凝胶基自供电材料的极端环境应用提供了科学借鉴。

关键字 纤维素，MXene，防冻凝胶，纳米发电机，自供电传感器

D15-P004

O 型环模块化摩擦纳米发电机可用于全海域实现稳健地采集波浪能

李豪华¹、刘官林^{1,*}

1. 广西大学

摩擦电纳米发电机最近成为捕获低频海洋能量的最有前途的技术之一。然而，摩擦纳米发电机的一些缺点，如体积能量密度低、通用性差、抗风暴能力差等限制了其商业化。在这里，我们介绍了一种用于蓝色能量收集的 O 型环发电机。该发电机可通过将不同角度的发电机模块灵活拼接而成。通过研究四个不同角度的发电机模块的共振频率和摆动振幅等配置参数，证明该发电机模块化的设计所带来的三个优点：首先，根据不同环境和需求，O 型环发电机的响应频率可进行调整，以捕获全频率范围内的波浪能量。其次，其独特的 O 形圈结构为该发电机提供了全方位的能量采集能力。最后，由于其紧凑的内部设计，该发电机具有超高的空间利用率和高输出能力。通过拼接可以获得高达 29.90 μC 的电荷输出，并且其电荷体积密度计算为 6.62 nC/cm^3 。本研究提出了一种新的模块化设计，可为高效波浪能量收集提供新的思路。

关键字 可拼接、抗风暴、模块化、摩擦纳米发电机、蓝色能源

D15-P005

用于收集六自由度波浪能的花瓣结构摩擦纳米发电机

文宏桂¹、杨培远¹、刘官林¹、徐淑星¹、姚辉璐¹、李旺桃¹、瞿杭¹、丁家军¹、黎家余¹、万玲玉^{1,*}

1. 广西大学

海洋波浪运动蕴藏着巨大能量，其高效开发可为海洋物联网等智慧海洋信息系统提供即采即用的分布式可移动电源。摩擦纳米发电机（TENG）具有结构简单、选材广泛和低频高效的优点，特别适合波浪能的收集和能源开发。在复杂的海洋环境中，作为能量采集器 TENG 有可能做各种运动。针对不同自由度动能的收集，我们设计了一种花瓣结构摩擦纳米发电机（FL-TENG），它由 6 个花瓣状子 TENG 和 2 个花蕊子 TENG 组成，通过水波触发引起“花开”和“花闭”的折叠运动，将水波动能转换为电能。在 FL-TENG 中，花瓣部分可收集 2 个自由度的水平运动动能和 3 个自由度的旋转运动动能，花蕊部分可收集竖直方向上的垂直运动动能。在不同水波环境下，FL-TENG 展现了优异的发电性能。在 1.3 Hz，波高 8 cm 的水波条件下，FL-TENG 的峰值电压为 160 V，电流为 48 μ A，可在一分钟内将 220 μ F 的电容电压充到 1.3 V，可驱动手表、计算器、湿度计等小型电子器件工作，在自驱动海洋传感与分布式供电系统等方面具有广阔的应用前景。

关键字 波浪能，摩擦纳米发电机，花瓣结构，六自由度，分布式供电系统

D15-P006

基于光栅结构独立层模式的摩擦纳米发电机用于自驱动加速度实时传感

侯宇¹、刘宇峰¹、李丁^{1,*}、王中林¹

1. 中科院纳米能源与系统研究所

加速度传感器在地震报警、人体运动识别、车辆约束系统等方面有着广泛的应用。然而，现有的商用加速度传感器在需要外部电源、制造成本高、自驱动时信号小等方面存在一些局限性。本文介绍了一种光栅结构的独立层式摩擦电纳米发电机（GF-TENG），能够实时检测位移、速度和加速度，具有自驱动、低成本和足够大的输出信号。GF-TENG 的具有光栅结构电极的滑块在定子上滑动，而另一个光栅结构电极由于静电感应而产生周期性开路电压。通过识别开路电压的形状，通过系统优化仿真和实验，它最佳可以在几百微米的范围内实时感知加速度。此外，通过将弹簧和 GF-TENG 组装成基于光栅结构的 TENG 加速度传感器（GTAS），加速度传感范围可扩展至所需范围，例如 5.0 至 45.0 m/s^2 。此外，GTAS 被证明能够感知车辆运动，并且是模型车上车辆约束系统的一部分。这项工作报告了一种新的自驱动加速度传感器，具有足够大的输出，用于实时运动传感和碰撞检测，可进一步应用于机器人和人体运动识别。

关键字 自驱动 加速度传感器 摩擦纳米发电机 独立层模式 碰撞检测

D15-P007

Smart Pillow Based on Flexible and Breathable Triboelectric Nanogenerator Arrays for Head Movement Monitoring during Sleep

Jiabin Zhang^{1,*}, Haiying Kou¹, Ding Li¹, Zhonglin Wang¹

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences

Sleep quality plays an essential role in human health and has become an index for assessing physical health. Selfpowered, sensitive, noninvasive, comfortable, and low-cost sleep monitoring sensors for monitoring sleep behavior are still in high demand. Here, a pressure-sensitive, noninvasive, and comfortable smart pillow is developed based on a flexible and breathable triboelectric nanogenerator (FB-TENG) sensor array, which can

monitor head movement in real time during sleep. The FB-TENG is based on flexible and breathable porous poly(dimethylsiloxane) (PDMS) with a fluorinated ethylene propylene (FEP) powder and exhibits pressure sensitivity and durability. The electrical output of the FB-TENG is further optimized by modifying the porous structure and the FEP powder. Combining the FB-TENG and the flexible printed circuit (FPC), a self-powered pressure sensor array is fabricated to realize touch sensing and motion track monitoring. The smart pillow is formed by laying the self-powered pressure sensor array on an ordinary pillow to realize real-time monitoring of the head position in a static state and head movement trajectory in a dynamic state during sleep. Additionally, the smart pillow also has an early warning function for falling out of bed. This work not only provides a viable sensing device for sleep monitoring but also could be extended to real-time monitoring of some diseases, such as brain diseases and cervical spondylosis, in the future. It is expected to introduce a practical strategy in the real-time mobile healthcare field for disease management.

Key words sleep monitoring, smart pillow, triboelectric nanogenerator, pressure sensor array, head movement

D15-P008

水凝胶集成柔性 Micro LED 显示装置

王江文¹、化麒麟^{1,*}

1. 北京纳米能源与系统研究所

GaN 基 Micro LED 具有高亮度、低功耗、长寿命和耐用性，广泛应用于信息显示、图案照明、光电医学器件等领域。新一代智能可穿戴电子产品要求组件具有动态表面柔性和安全的生物贴附性，柔性的 Micro LED 可以满足这些要求。本文基于硅衬底垂直结构的蓝绿光 Micro LED 优秀的光学特性，设计了一种高分辨率的蓝绿光 Micro LED 柔性显示装置器件。该装置器件通过干法刻蚀去除了硅衬底层，对比了经剥离前后 LED 芯片的形貌和光电性能对比，发现柔性 Micro LED 阵列仍然保留了完整的芯片结构和电气特性以及良好的光学性能，可以满足大曲率的形变弯曲。同时，设计制备了一种耐用的 PET(Ag)+PAM-Li-GI 水凝胶的柔性复合电极层，通过透光率和拉伸实验等分析，发现该柔性复合电极具有柔软、高透明、导电和自吸附特性，能够作为电极层的同时充当 LED 器件的封装层。最后集成在柔性蓝绿光 Micro LED 阵列获得了柔性的 Micro LED 显示贴片，具有较低的功耗和良好的可视角度，不仅可以实现视网膜级的高分辨率图案化显示，也可以贴附在较大曲率如肢体表面。结合水凝胶友好的生物相容性，能够为下一代高分辨柔性显示器提供广泛的应用场景。例如可穿戴的全彩 Micro LED 智能曲面显示设备和可共形的生物医疗监测系统。

关键字 GaN, Micro LED, 柔性显示

D15-P009

基于涡激振荡型摩擦纳米发电机的风能高效捕获研究

黄悦¹、王岩¹、王雅巍¹、王昊¹、徐敏义^{1,*}

1. 大连海事大学轮机工程学院

对标碳中和，实现一次能源有序减量替代，需大力发展可再生能源，对于低碳社会来说，风能是一种很有前途的可再生能源。本研究旨在开发一种基于涡激振荡型摩擦纳米发电机的风能高效捕获装置，以回收风能，并将其转换为电能。该装置由一个风向标、内部发电单元、外部框架、四个弹簧、一个方形柱体和一个圆形转盘组成。内部发电单元由聚四氟乙烯(PTFE)球、蜂窝状框架和两个铜电极组成。框架结构和内部蜂窝结构的发电单元采用 3D 打印获取，整个风电装换装置安装在圆形转台上，其能够通过整合风向

标来适应风向，一旦风围绕方形柱体流动，它就会上下振动，从而产生交变的电信号，实现风能向电能的转换。质量比 308.57 的风电转换装置在 200 mΩ 的负载电阻下，的最大输出功率达 1.7 mW，相应的峰值为 62.W/m³。本研究提供了一种高性能的风能采集器。

关键字 风能；摩擦纳米发电机；自供电；涡激振荡

D15-P010

用于远程医疗的高敏感度摩擦电贴片

鲁博涵¹、雷浩^{1,2}、刘伊娜¹、赵春¹、文震^{2,*}、孙旭辉²

1. 西交利物浦大学

2. 苏州大学

医疗保健互联网（IoH）可以借助可穿戴设备将用户的生理和行为数据上传到医疗中心进行分析和诊断，这对于预防和控制老年人常见的慢性疾病非常重要。因此，高灵敏度的可穿戴压力传感器是物联网健康系统的基本和关键组成部分。然而，对于物联网系统来说，长期实时监测用户的生理信号要求可穿戴压力传感器具有超低甚至零功耗。本文提出了一个物联网健康系统，其核心包括一个高灵敏度的健康监测传感器，一个用于数据预处理和显示的用户端，以及一个用于数据收集和诊断的医疗端。该系统的核心部件是一个柔性可穿戴摩擦电健康贴片，它由一对铝电极和一个多孔电介质膜组成，实现了在低压范围（1-5 kPa, 5.93kPa⁻¹）和高压范围（5 kPa-25 kPa, 0.205 kPa⁻¹）内都能识别各种压力。并通过建立力-电耦合模型，对压力传感性能的影响因素进行了深入研究。为了验证这些传感器在医疗网络系统中的应用潜力，将其用于实时监测脉搏，心跳，眨眼，呼吸，喉咙吞咽等日常生理信号。为了提取 TENG 的有效信号，设计了信号放大和滤波，最终通过蓝牙发送到用户端和医疗端进行数据处理和分析。

D15-P011

Adaptive Wind-Evoked Power Devices for Autonomous Motor Control Applications

Bingjun Wang^{1,*}, Wei Sha¹, Qilin Hua¹

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences

With the explosive development of artificial intelligence, power devices integrated with real-time sensing functions have attracted tremendous attention and will play an important role in intelligent control applications. In this work, a cantilever-structured AlGaIn/AlN/GaN high electron mobility transistor integrated with ultrahigh sensitivity and large output power modulation is fabricated through a low-damage anisotropic and isotropic etching process, and achieves excellent electrical performance with a maximal output current of 236 mA/mm at a gate bias of 1 V. Due to the facile structure of cantilever, the device is capable for sensing external stimuli, e.g., gentle wind, and in turn control power output. Significantly, the device exhibits an extraordinarily large output power modulation (ΔP : 1.68×10^3 W/cm²) under external stimuli in the saturation region, and obtains an ultrahigh strain sensitivity (gauge factor: 1472) under gate voltage in the linear region. Moreover, the wind-evoked mutational behavior of crickets is emulated by the device to demonstrate the capability of autonomous motor control. Such wind-evoked power devices ingeniously coupled with dynamic piezotronic effect will have great significance in real-time sensing and actuation applications in artificial intelligence, autonomous driving, and aerospace.

D15-P012

Ultrastretchable Organogel/Silicone Fiber- Helical Sensors for Self-Powered Implantable Ligament Strain Monitoring

朱俊波^{1,*}、盛非凡¹、董凯¹、王中林¹

1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所

Some of implantable sensors have some shortcomings, such as requiring an external power supply or poor flexibility and stability. Herein, an organogel/silicone fiber-helical sensor based on a triboelectric nanogenerator (OFSTENG) is developed for power-free and sutureable implantation ligament strain monitoring. The OFS-TENG with high stability and ultrastretchability is composed of an organogel fiber and a silicone fiber intertwined with a double helix structure. The organogel fiber possesses the merits of rapid preparation (15 s), good transparency (>95%), high stretchability (600%), and favorable stability (over 6 months). The OFS-TENG is successfully implanted on the patellar ligament of the rabbit knee for the real-time monitoring of knee ligament stretch and muscle stress, which is expected to provide a solution for real-time diagnosis of muscle and ligament injuries.

关键字 organogel, triboelectric nanogenerators, implantations, self-powered sensors, ligament strain monitoring

D15-P013

Helical Fiber Strain Sensors Based on Triboelectric Nanogenerators for Self-Powered Human Respiratory Monitoring

马宇欣^{1,*}、宁川¹、董凯¹、王中林¹

1. 中国科学院北京纳米能源与系统研究所

Respiration is a major vital sign, which can be used for early illness diagnosis and physiological monitoring. Wearable respiratory sensors present an exciting opportunity to monitor human respiratory behaviors in a real-time, non-invasive, and comfortable way. Fiber-shaped triboelectric nanogenerators (FS-TENGs) are attractive for their comfort and high degree of freedom. However, the single-electrode FS-TENGs cannot respond to their own tensile strains, and the coaxial double-electrode FS-TENGs show low sensitivity to strain due to structural limitations. Here, a type of helical fiber strain sensor (HFSS) is developed, which can respond to tiny tensile strains. In addition, a smart wearable real-time respiratory monitoring system is developed based on the HFSSs, which can measure some key breathing parameters for disease prevention and medical diagnosis. An intelligent alarm can automatically call a preset mobile phone for help in response to respiratory behavior changes.

关键字 fiber-shaped, strain sensing, helical structure, triboelectric nanogenerators, respiratory monitoring

D15-P014

High output direct-current power fabrics based on the air breakdown effect

Xiao Chen^{1,*}, Renwei Cheng¹, Kai Dong¹, Zhong Lin Wang¹

1. Beijing Institute of nanoenergy and systems

Energy-harvesting textiles based on triboelectric nanogenerators (TENGs) have attracted intense attention, due to their broad potential applications in wearable electronics. However, the bottlenecks of limited and alternating current electrical output have greatly hindered the development of textile TENGs. Here, by simply and easily coating two electrodes on the top side (breakdown electrode) and bottom side (friction electrode) of a

polyester–cotton fabric, a light-weight, highly flexible and wearable fabric-based direct current TENG (FDC-TENG) with high power output is developed. Various structural parameters and environmental factors are thoroughly and systematically explored for comprehensive understanding of the FDC-TENG. The surface charges induced by triboelectrification can be unidirectionally and efficiently harvested through the conductive plasma channel caused by air breakdown, which endows the finger-sized FDC-TENG with the abilities to light up 99 bulbs and 1053 LEDs and drive watches and calculators easily and directly without rectifying or capacitor charging. This work may provide a paradigm shift for high output direct-current power fabrics and expand their scope for application in wearable electronics.

Key words Triboelectric nanogenerator, energy harvesting, smart textiles

D15-P015

Stretchable, Washable, and Ultrathin Triboelectric Nanogenerators as Skin-Like Highly Sensitive Self-Powered Haptic Sensors

Chuanhui Wei ^{1,*}, Yang Jiang ¹, Kai Dong ¹, Zhong Lin Wang ¹

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, CAS

Accompanying the boom in multifunctional wearable electronics, flexible, sustainable, and wearable power sources are facing great challenges. Here, a stretchable, washable, and ultrathin skin-inspired triboelectric nanogenerator (SI-TENG) to harvest human motion energy and act as a highly sensitive self-powered haptic sensor is reported. With the optimized material selections and structure design, the SI-TENG is bestowed with some merits, such as stretchability ($\approx 800\%$), ultrathin ($\approx 89 \mu\text{m}$), and light-weight ($\approx 0.23 \text{ g}$), which conformally attach on human skin without disturbing its contact. A stretchable composite electrode, which is formed by homogeneously intertwining silver nanowires (AgNWs) with thermoplastic polyurethane (TPU) nanofiber networks, is fabricated through synchronous electrospinning of TPU and electrospaying of AgNWs. Based on the triboelectrification effect, the open-circuit voltage, short-circuit current, and power density of the SI-TENG with a contact area of $2 \times 2 \text{ cm}^2$ and an applied force of 8 N can reach 95 V , $0.3 \mu\text{A}$, and 6 mW m^{-2} , respectively. By integrating the signal processing circuits, the SI-TENG with excellent energy harvesting and self-powered sensing capability is demonstrated as a haptic sensor array to detect human actions. The SI-TENG exhibits extensive applications in the fields of human–machine interface and security systems.

Key words triboelectric nanogenerators, electronic skins, flexible electronics

D15-P016

Enhanced Output of On-Body Direct-Current Power Textiles by Efficient Energy Management for Sustainable Working of Mobile Electronics

Renwei Cheng ^{1,*}, Kai Dong ¹, Zhong Lin Wang ¹

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems

Triboelectric power textile (TPT) that can harvest widespread but always neglected human biomechanical energy is considered a promising and reliable energy source for wearable electronics. However, the alternating current and high impedance of triboelectric nanogenerators as well as the meager electrical output caused by the properties of the textile itself greatly restrict its practical applications. Here, an autonomous power textile with practical application value, which consists of a high-output direct-current TPT (DC-TPT) and a miniaturized

energy management module (EMM), is achieved for continuous operation of wearable and mobile electronics. The home-preparable multiarray DC-TPT can harvest transferred charge of 5.5 μC per cycle with nine repeating units. Moreover, it is found that incorrect sewing positions of the polytetrafluoroethylene (PTFE) yarn change the working mechanism with a decreased DC output. The EMM with energy conversion efficiency of 82.6% can reduce the impedance of DC-TPT from 200 to 1.6 $\text{M}\Omega$. With its powerful assistance, the watch can work continuously for 172 s just by manually sliding the DC-TPT 1.6 s on an arm, and wireless signals can be transmitted to 281 m away after sliding for 2 min. Various widely used electronics can also be easily and continuously driven.

Key words Triboelectric nanogenerator, energy harvesting, smart textiles, energy management

D15-P017

Flame-Retardant Textile-Based Triboelectric Nanogenerators for Fire Protection Applications

Tianmei Lv^{1,*}, Renwei Cheng¹, Kai Dong¹, Zhong Lin Wang¹

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences, Beijing

Textile-based triboelectric nanogenerators (T-TENGs), combining the functions of energy harvesting and self-powered sensing with advantages of breathability and flexibility, have received intensive attention, which is vital to the rapid advancements in smart textiles. However, there exists few reports of T-TENGs applied to fire under the intelligent era of high requirements for devices with versatility and multisenario practicability. Here, in combination with flame-retardant conductive cotton fabric, polytetrafluoroethylene coated cotton fabric, and a divider, a low-cost and environmentally friendly flame-retardant textile-based triboelectric nanogenerator (FT-TENG) is developed, which is endowed with excellent fire resistance and outstanding energy harvesting capabilities. The cotton fabrics treated with a layer-by-layer self-assembly method show great self-extinguishing performance. Besides, the maximum peak power density of the FT-TENG can reach 343.19 mW/m^2 under the tapping frequency of 3 Hz. Furthermore, the FT-TENG still keeps 49.2% of the initial electrical output even after being burned at 17 different positions; 34.48% of the electrical output is also retained when the FT-TENG is exposed to 220 $^{\circ}\text{C}$. Moreover, the FT-TENGs are successfully applied as energy harvesters for firefighters and self-powered sensors for forest self rescue and fire alarm systems. This work may provide a promising potential for multifunctional smart textiles in energy harvesting, self-powered sensing, and life or property security.

Key words flame retardancy, triboelectric nanogenerator, self-powered, smart textiles, layer-by-layer assembly

D15-P018

Ultrathin Eardrum-Inspired Self-Powered Acoustic Sensor for Vocal Synchronization Recognition with the Assistance of Machine Learning

Yang Jiang^{1,*}, Zhong Lin Wang¹

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems

With the rapid development of human-machine interfaces, artificial acoustic sensors play an important role in the hearing impaired. Here, an ultrathin eardrum-like triboelectric acoustic sensor (ETAS) is presented consisting of silver-coated nanofibers, whose thickness is only 40 μm . The sensitivity and frequency response range of the ETAS are closely related to the geometric parameters. The ETAS endows a high sensitivity of 228.5

mV Pa⁻¹ at 95 dB, and the ETAS has a broad frequency response ranging from 20 to 5000 Hz, which can be tuned by adjusting the thickness, size, or shape of the sensor. Cooperating with artificial intelligence (AI) algorithms, the ETAS can achieve real-time voice conversion with a high identification accuracy of 92.64%. Under good working property and the AI system, the ETAS simplifies signal processing and reduces the power consumption. This work presents a strategy for self-power auditory systems, which can greatly accelerate the miniaturization of self-powered systems used in wearable electronics, augmented reality, virtual reality, and control hubs for automation.

Key words Triboelectric nanogenerator; self-powered; acoustic sensor; voice recognition; machine learning

D15-P019

Self-Powered Intelligent Buoy Based on Triboelectric Nanogenerator for Water Level Alarming

Xi Liang^{1,*}

1. Beijing institution of nanoenergy and nanosystem

With increasing global warming, catastrophic floods have threatened people's lives seriously and caused huge economic losses. However, present water hazard alarming systems generally rely on commercial batteries, limiting the intelligent development of disaster prevention planning and maintenance costs. In order to break the limitation, this work applies triboelectric nanogenerators (TENGs) to water hazard alarming. Based on the TENG, a self-powered intelligent buoy is constructed. Utilizing the buoy to transmit 433 MHz radio frequency signals to 25 meters away, a water level alarm system and a water level information exchange system with a mobile phone are successfully realized. This work extends applications of TENGs toward water wave energy harvesting and provides a new strategy for water hazard alarming, which is conducive to the fields of carbon neutralization, Internet of Things, and disaster prevention.

Key words self-powered, triboelectric nanogenerator, blue energy

D15-P020

基于改性丝素蛋白电极的可穿戴智能控制系统

许子颀^{1,*}、王中林¹

1. 中科院北京纳米能源与系统研究所

智慧物联时代可穿戴电子技术蓬勃发展, 先进智能可交互设备已大范围替代传统非人机交互设备, 为消费者带来更为便捷的人机交互体验。现有智慧交互控制系统主要为手机 app 与智能音箱等刚性设备, 其便携性 (如智能音箱不方便携带) 与场景操作性 (如手机需要实时在使用者身上) 仍有待加强。展示项目采用基于摩擦电荷分离技术的改性丝素蛋白电极基可穿戴自驱动传感系统, 利用丝素材料优异的生物相容性与改性后其增强的力学/化学稳定性, 皆在实现多功能智能设备控制的精确化传感与无源化传感。

关键字 纳米发电机, 柔性电子, 可穿戴传感

D15-P021

Ultralight, elastic, hybrid aerogel for flexible/ wearable piezoresistive sensor and solid-solid/ gas-solid coupled triboelectric nanogenerator

Tianci Huang^{1,*}, Weiguo Hu¹

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences

Aerogels have been attracting wide attentions in flexible/wearable electronics because of their light weight, excellent flexibility and electrical conductivity. However, multifunctional aerogel-based flexible/ wearable electronics for human physiological/ motion monitoring, and energy harvest/ supply for mobile electronics, have been seldom reported yet. In this study, a kind of hybrid aerogel (GO/CNT HA) based on graphene oxide (GO) and carboxylated multiwalled carbon nanotubes (CMWCNTs) was prepared which can not only used as piezoresistive sensors for human motion and physiological signal detections, but also as high performance triboelectric nanogenerator (TENG) coupled with both solid-solid and gas-solid contact electrifications (CE). The repeatedly loading-unloading tests with 20000 cycles exhibited its high and ultra-stable piezoresistive sensor performances. Moreover, when the obtained aerogel was used as the electrode of a TENG, high electric output performance was produced due to the synergistic effect of solid-solid, and gas-solid interface CEs (three-dimensional electrification: solid-solid interface CE between the two solid electrification layers; gas-solid interface CE between the inner surface of GO/CNT HA and the air filled in the aerogel pores). This kind of aerogel promises good applications for human physiological / motion monitoring and energy harvest / supply in flexible/ wearable electronics such as piezoresistive sensors and flexible TENG.

Key words aerogel, multifunction, triboelectric nanogenerator, piezoresistive sensors

D15-P022

Suppressing the Exacerbated Hydrogen Evolution of Porous Zn Anode with an Artificial Solid-Electrolyte Interphase Layer

Xue Bai ^{1,*}, Weiguo Hu ¹

1. Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences

Rechargeable Zn batteries are widely studied as aqueous, safe and environmentally friendly alternatives to Li-ion batteries. The 3D porous Zn anode has been extensively reported for suppressing the Zn dendrite growth and accelerating the electrode kinetics. However, we demonstrate herein that the undesirable hydrogen evolution reaction (HER) is also exacerbated for porous Zn electrode. Therefore, a polytetrafluoroethylene (PTFE) coating is further applied on the porous Zn serving as the artificial solid-electrolyte interphase (SEI), which is demonstrated to effectively inhibit the hydrogen evolution and maintain the Zn plating kinetics. By utilizing the synergistic effects of the porous morphology and artificial SEI layer, better performances are obtained over porous Zn or bare Zn foil, including the dendrite-free Zn plating/stripping up to 2000 h at 2 mA cm⁻², and extended cycling in the Zn||V₂O₅ cell. This work suggests two complementary strategies for achieving simultaneously dendrite-free and side-reaction-suppressed Zn batteries.

Key words dendrite-free anode, hydrogen evolution, Zn battery, metal electrode, interface modification.

D15-P023

基于 3D 打印制备的大压电系数和高功率密度的橄榄球能量回收器

袁小婷 ¹、董蜀湘 ^{1,*}

1. 北京大学

压电聚合物具有灵活、易于加工成任何形状的特点，但是它们的压电系数（例如 d33）非常低（~24 pC

N^{-1})。在这里,我们报告了 3D 打印的多层 β 相 PVDF-TrFE 共聚物,无需高温退火和复杂的转移过程,表现出更高的有效压电系数 d_{33} (六个 $10\ \mu m$ 层约为 $130\ pC\ N^{-1}$)。为了确认其高功率密度,制备了使用多层共聚物并以弯张放大机制运行工作的橄榄球结构能量收集器。实验结果表明,在 $0.046\ MPa$ 的压力下,它可以产生的峰值电压和电流为 $\sim 88.62\ V_{pp}$ 和 $353\ \mu A$, 分别是单层 PVDF-TrFE 采集器的 2.2 倍和 10 倍。更值得注意的是,其峰值输出功率密度可以高达 $16.4\ mW\ cm^{-2}$;而在 $568\ k\Omega$ 的负载下,它的负载功率是 $5.81\ mW\ cm^{-2}$ 。本工作所提出的多层共聚物加工方法和橄榄球结构中的弯张机制显示出未来微能源在柔性可穿戴电子设备和无线传感器网络中发展的巨大潜力。

关键字 3D 打印; 弯张放大; 多层压电薄膜; 能量回收器

D15-PO001

基于压电光电子效应的柔性 InGaN/GaN 多个量子阱在织物上的光致发光增强

沙伟^{1,*}

1. 北京纳米能源与系统研究所

基于织物的可穿戴电子产品在可穿戴设备、万物互联和人工智能的新兴应用中显示出优势。与有机材料相比,基于无机半导体(例如 GaN)的器件通常具有优越的特性和高稳定性的优点。当 GaN 基异质薄膜从其刚性基板转移到柔性/织物基板上时,应变的变化会影响器件性能。在这里,我们演示了使用有效的剥离技术将 InGaN / GaN 多量子阱 (MQW) 薄膜转移到柔性/织物基板上。通过原子力显微镜和高分辨率 X 射线衍射表征了 InGaN/GaN MQWs 薄膜的物理性能,表明转移薄膜不会遭受巨大的损伤。在织物上转移的薄膜中观察到优异的柔韧性,并且压电-光电子效应增强了光致发光 (PL) 强度,随着薄膜曲率增加到 10%,施加外部应变,光致发光 (PL) 强度增加了约 6.25/mm。此外,还用不同应变下 GaN/InGaN/GaN 异质结的能带图阐明了压电-光电子效应的内调制机理。这项工作将有助于指导在织物上构建高性能设备,并推动柔性和可穿戴电子产品的快速发展

关键字 柔性 InGaN/GaN 多量子阱 光致发光 织物 压电光电

D15-PO002

Mechanically Ultra-Robust, Elastic, Conductive, and Multifunctional Hybrid Hydrogel for a Triboelectric Nanogenerator and Flexible/Wearable Sensor

Junwen Zhong^{1,*}

1. University of Macau

A fully interconnected and intelligent living environment has been a grand challenge for future smart society and it is critically essential to develop the interactive sensing and actuating systems to bridge the human-machine interfaces. Here, flexible sensors and actuators based on high-performance piezoelectret or piezoelectric polymers are fabricated to selectively perform either the actuating or sensing function. As sensors, both low pressure detection limit for sensing resolution and excellent stability have been achieved, with typical application in monitoring human pulse signals for health diagnosis. As actuators, mechanical vibrations with large output force have been produced for providing haptics feedback to human skin. Such actuators are also used to construct soft robotics with high agility and controllability to explore surroundings, like detecting gas leakage. The design principle together with the sensing and driving characteristics can be further developed and extended to other soft matters and flexible devices.

Key words Nanogenerators, Wearable sensors, Soft actuators, Piezoelectret, Human-Machine Interactivity