

压电电子学效应及纳米发电机 带来能源与传感新革命

2007年,我们在国际上首次提出压电电子学原创性概念和基本理论,并形成了相应研究领域^[1-2]。由于具有潜在的应用前景,压电电子学引起国际学术界和企业界的广泛关注,形成诸多热点研究领域,例如纳米发电机等。这些研究有望改变人类能源的现有格局,也将解决国家战略新兴行业重大需求。

1 压电电子学与传感器件

压电电子学利用压电效应改变金属-半导体的界面势垒和p-n结区输运特性,从而实现外界环境与电子器件直接相互作用。压电电子学效应是利用应变引起的界面极化电荷调制界面处能带结构,进而有效地调节和控制界面或结区载流子输运过程的物理效应。压电光电子学效应是利用压电电势来控制载流子产生、分离、传输和复合过程,进而提高光电子器件性能的效应。这两种物理效应引起了全新的物理现象和潜在应用,例如可以变革传统三极管的物理结构、大大提高光子探测器、太阳能电池及LED的性能等(图1)。相关研究已成为国际上纳米科学技术研究的前沿和热点。



王中林,中国科学院外籍院士、欧洲科学院院士、加拿大工程院外籍院士。现任中国科学院北京纳米能源与系统研究所所长、中国科学院大学讲席教授、纳米科学与技术学院院长、佐治亚理工学院终身校董事讲席教授。研究方向为纳米能源技术、自驱动传感技术与新型器件半导体器件等。

术革命,使人类生产和生活方式发生革命性变化。在后摩尔定律时代,电子器件性能朝着个性化、可移动化、柔软化、传感化及自供能化等方向发展。未来新一代信息技术必将沿着器件高性能化及功能化两种趋势的交叉方向继续向前发展。研究表明,纳米压电材料、压电电子学/压电光电子学器件及基于纳米结构阵列的主动式传感系统在解决这些问题方面展示出引人注目的技术优势和应用前景。压电电子学被美国Sandia国家实验室列入在后场效应三极管(FET)时代与量子电子学、自旋电子学等平行的新生颠覆型技术。压电电子学器件与硅基技术的有效集成有望在人机接口、纳米机器人的传感和驱动、智能化与个性化的电子签名、智能微纳机电系统、纳米机器人和能源科学等领域提供独特的应用。

总之,压电电子学研究具有新的物理内涵,可构建新的学科体系,可构筑新的信息材料与器件,引发新的产业变革。既有科学上的重大原始创新,也将解决国家战略新兴行业重大需求。

2 纳米发电机

2006年,笔者团队首次发明了压电式纳米发电机^[3]。2012年,笔者首次基于摩擦起电和静电感应效应发明了摩擦纳米发电机(TENG)^[4]。TENG可以有效地收集自然界中各种来源的机械能量,是收集低频、低振幅机械能的一个高效且颠覆性技术,为解决新时代分布式电子器件的能源供应提供了一种全新的微纳能源范例。

TENG是利用介质材料的表面电荷在周期性外力作用下产生交变的电场驱动外电路电子周期性的流动,从而对外产生电能的发电技术。笔者通过在麦克斯韦方程组位移电流一项中引入介质极化变化产生的电流这一项 $\partial P_s/\partial t$ (P_s 为介质极化矢量,其主要是由于表面电荷的存在引起的,是独立于电场的存在),为TENG找到了理论源头。TENG是动生麦克斯韦位移电流电磁波理论和技术后,在微纳能源与传感方面的另一重大应用。基于此,笔者发展了具有加速运动介质中的力-电-磁3项耦合的电磁理论:动生麦克斯韦方程组^[5-8]。

基于其独特优势,TENG在以下5个方面的应

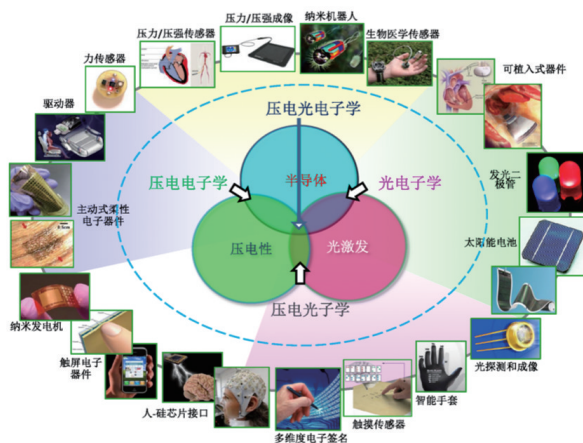


图1 压电电子学与压电光电子学的应用领域

压电电子学器件的特性能很好地顺应后摩尔定律时代电子学发展趋势。以微电子技术为核心的信息技术的发展促成并带动了20世纪的信息技

用具有重大战略意义(图2)。

1) 微纳能源。随着世界逐渐进入以物联网、传感网络、大数据、机器人和人工智能等为代表的新时代,数以万亿计且广泛分布的电子器件对能源的需求和能源结构提出了新的挑战。TENG具有质量轻、体积小、材料选择广泛、结构简单、易安装、免维护等特点,且多样化的工作模式可以适应不同的工作场景,已经被证实能够将人体和环境中的机械能收集起来,实现电子器件和传感器的可持续工作,正是解决新时代分布式电子器件供电的理想解决方案。TENG在收集环境低频机械能方面展现出独特的优势,在植入式医疗、可穿戴电子以及物联网器件的供电方面潜力巨大。基于TENG实现电子器件的自驱动化可以摆脱电源的制约,为新时代分布式电子器件的供电提供了新的范式,是未来物联网发展微小集成化、无线移动化、功能智能化的重要技术支撑。

2) 自驱动传感。TENG不但可用于微纳能源收集,还可用作自驱动传感器,即无需外部电源驱动,是一种实现自供电功能的新型传感技术手段。摩擦电式传感器具有多形态、低成本的优势,在人体运动/健康、生物医疗、人机交互、环境监测及基础设施安全等领域展现出广阔的应用前景。通过与信号处理和传输模块集成,可以进一步实现摩擦电式自供电系统的稳定运行和无线传感。基于TENG的自驱动传感技术的提出,不仅推进了TENG的实际应用与产业化实施,还将为中国传统产业转型与技术升级提供支撑,并有望推动当代经济结构调整和转型。

3) 蓝色能源。目前,海洋能开发的主要技术路径是将海洋能量转化为发电机装置中机构的机械能,经过传动装置的调理,进一步转化为电磁式发电机的动力而发电。此路径技术复杂、效率低、维护和运行成本高、装置可靠性差,制约其大规模商业化开发利用和发展。而TENG对于收集无序、低频海洋能源具有显著优势,带来了海洋能高效开发利用的全新机遇和未来,有望构建划时代的智慧海洋,高效利用海洋能源、生物、矿场、水等稀缺资源,以及全方位获取辐射、污染、洋流、军事等重要信息,为碳中和提供新的范式。

4) 高压电源。TENG的高电压、低电流特性使其可作为新型高压电源,具有较好便携性和安全性。基于TENG的新型高压电源通常无需复杂的电源转换器,可极大简化整个系统,且较低的电流对人员和仪器安全威胁较小,在大幅减小高压电源体积的前提下,兼具轻巧、实用、方便且高效的优点。因此,开发基于TENG的新型高压电源具有极大应用价值,在高端生物与化学分析仪器、废弃物回收和空气净化方面展现出应用前景。此外,基于TENG的高压电源在自驱动静电纺丝、微流泵、微流控、微等离子体激发及静电驱动等方面应用潜力很大。开发基于TENG的新型高压电源可满足电

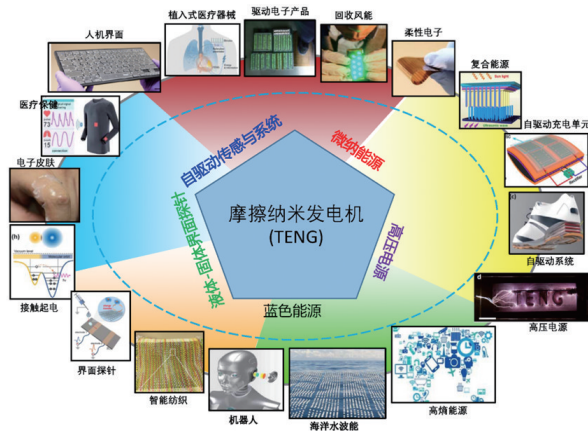


图2 纳米发电机的五大应用领域和相关覆盖的行业

子设备小型化、高效化和高性能化的新时代需求。

5) 探测界面起电机理的新型探针。利用单电极的TENG,发展出了探索液体—固体界面电子转移的新型测试方法。

总之,纳米发电机在微纳能源、自驱动传感/系统、蓝色能源及新型高压电源方面具有广阔应用前景。每次新能源技术突破都带动人类文明向前巨大迈进,有理由相信,TENG技术也将改变人类能源现有格局,为人类文明进步带来巨大推动力。

参考文献 (References)

- [1] Wang Z L. Nanopiezotronics[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(6): 889–992.
- [2] Yang Q, Guo X, Wang W H, et al. Enhancing sensitivity of a single ZnO micro/nanowire photodetector by piezophototronic effect[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(10): 6285–6291.
- [3] Wang Z L, Song J H. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays[J]. *Science*, 2006, 312(5771): 242–246.
- [4] Fan F R, Tian Z Q, Wang Z L. Flexible triboelectric generator[J]. *Nano Energy*, 2012, 1(2): 328–334.
- [5] Wang Z L. On the expanded Maxwell's equations for moving charged media system—general theory, mathematical solutions and applications in TENG[J]. *Materials Today*, 2022, 52: 348–363.
- [6] Wang Z L. Maxwell's equations for a mechano-driven, shape-deformable, charged media system, slowly moving at an arbitrary velocity field (r, t) [J]. *Journal of Physics Communications*, 2022, 6(8): 085013.
- [7] 王中林, 邵佳佳. 非匀速运动介质系统中的动生麦克斯韦方程组——低速与非相对论近似[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(8): 1198–1211.
- [8] 王中林, 邵佳佳. 面向工程电磁学的动生麦克斯韦方程组及其求解方法[J/OL]. <https://doi.org/10.1360/SST-2022-0226>.

(中国科学院北京纳米能源与系统研究所, 北京 101400)