

微纳系统中的可持续自供型电源: 能源研究中的新兴领域

王中林^{①②}

① Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0245, USA;

② 华中科技大学武汉光电国家实验室(筹), 武汉 430074

E-mail: zlwang@gatech.edu

2010-07-09 收稿, 2010-07-19 接受

国家自然科学基金(40830636, 40671034)和中国科学院资源环境领域野外台站研究基金资助项目

摘要 自从手提电脑和手机等个人可移动电子产品普及以后, 解决小范围的用电显得格外重要. 我们目前主要靠的是蓄电池. 在未来不久, 由于微纳系统的发展以及它们在原位人体健康的实时监测、基础设施的监测、环境监测、物联网以及军事技术上的应用, 传统的利用蓄电池来提供电源的方法将不能满足或不能适应传感器网络的工作环境和要求. 在2005年, 作者提出了自驱动的概念, 其根本是利用从环境中收集的能量, 通过能量转换来驱动这些微纳系统, 实现功率自给. 本文介绍作为微纳系统中可持续自供型电源的一种——纳米发电机的研究和未来应用.

关键词

自驱动的纳米技术
纳米发电机
微纳系统中可持续
自供型电源
传感器网络
物联网

传统的能源研究和开发主要可以分为五大方面: 大范围能源的产生和转换; 可持续绿色能源的开发; 电力的有效传输和智能电网; 电能的高密度储存; 有效节能技术和能源回收. 我们对电能的需求绝大部分集中在工业用电、交通运输、建筑、家庭和办公用能. 这些对能源的需求可以靠大范围的电网来满足. 然而, 自从手提电脑和手机等个人可移动电子产品普及以后, 解决小范围的用电显得格外重要. 我们目前主要靠的是蓄电池. 在未来不久, 由于微纳系统的发展以及它们在原位人体健康的实时监测、基础设施的监测、环境监测、物联网以及军事技术上的应用, 传统的利用蓄电池来提供电源的方法就有可能不能满足或不能适应具体的工作环境和要求, 原因如下: 其一, 微纳系统的尺寸越来越小, 将来限制整个系统大小的是电源而不是其他器件; 其二, 将来实现全方位的监测所用到的微纳系统的数目和密度相当之浩大, 而且这些系统是可移动的, 利用更换电池的方案可能是不实际的或者不可取的; 其三, 驱动微纳系统

的功率源的功率非常之小, 一般都在毫瓦到微瓦级. 例如心脏起搏器的运转功率是大约5毫瓦, 蓝牙发射器的工作功率也是微瓦级. 如果我们把所有的驱动微纳系统的电源的总功率加在一起, 所需总电量也较小, 但这种特殊的能源是传统供电方法所不能满足的. 因此, 作者在2005年就提出了自驱动的概念 (self-powered nanotechnology)^[1,2], 其根本是利用从环境中收集的能量, 通过能量转换来驱动这些微纳系统, 实现功率自给. 纳米技术是把系统和器件做得小, 例如纳米探测器、纳米电动机, 而自驱动是解决它们的能源需求. 我们称这种能源是一种微纳系统中可持续自供型电源 (sustainable self-sufficient power source for micro/nano-systems). 而今自驱动的概念已经成为世界非常活跃的研究领域.

1 自驱动微纳系统的运转模式和可行性

自驱动的微纳系统将在生物传感、环境和基础设施监测、传感器网络和物联网中扮演重要的角色. 这

英文引用格式: Wang Z L. Sustainable self-sufficient power source for micro/nano-systems: A new field in energy research (in Chinese). Chinese Sci Bull (Chinese Ver), 2010, 55: 2472—2475, doi: 10.1360/972010-1295

些应用的共同点是基于许许多多的传感器以及它们所组成的网络。传感器网络设计只有在所有的传感器能够独立工作的情况下才能够实现,但这些传感器并不需要连续和同时处于工作状态,它们可以处于较长的待机状态或较短的收发状态。我们可以利用它处于较长的待机状态(standby mode)的时间从环境中收集能量并把它储存起来,而在暂短的收发状态(active mode)用收集的能量把信号传递出去。未来的健康监测是利用微型传感器来探测血糖、血压、心跳率、红白血球数比和癌细胞的存在等。我们可以从肌肉活动中来获取驱动这些微小器件的能量,可以每15~30分钟探测一次。对于环境和基础设施的监测,我们设想利用可容纳缺陷的设计方案(defect tolerant design)。考虑到环境和基础设施(隧道、桥梁、楼房等)的监测是一长时间的监测过程,而且传感器只需要在长时间内间隔性的工作。例如,如果我们在某一基础设施中放置一千个纳米器件,它们是分布在该设施的各个重要部位。如果我们假定其中40%的器件由于长时间的工作失去了探测的功能,而剩余60%工作的器件可以分别独立地探测该设施的工作状态。利用从600个纳米器件传输来的信息,我们可以统计地分析出该设施各个部位的工作状态。从统计分布的角度讲,在任何一刻,这600个纳米器件中总有几个是处于收发工作状态,可以实现实时的监测。这种允许有缺陷的设计是未来建立传感器网络的基本思路。它打破了传统利用几个传感器来检查某一设施的设计,而传统的设计是当其中一两个传感器失灵以后,整个监测系统就失灵了。最后,物联网中货物和人的跟踪最需要微小而独立工作的无线传感器,它们需要间隔性地与GPS和网络系统保持联系。这些传感器可能具有非常小的尺寸,搜寻他们可能是一项巨大的工作。如果这些传感器是用电池带动的,而且跟踪的物品是上亿甚至几百亿件,那么充电或更换电池的工作量将是如此巨大以致于在实际中不可实现。同时,大量的电池材料可能对环境有不良的影响。因此,我们必须寻找利用环境中已有的和不规则的能源来驱动未来的微纳系统。

2 一种可持续自供型电源——纳米发电机

我们生活的环境中充满了各种各样的能量,例如震动能、形变能、肌肉活动能、化学能、生物能、微风能、太阳能、热能等。如果我们利用纳米技术可

以把这些无时不有、无处不有的能量转换为电能来带动一些小型的电子器件,就可以制造出自驱动的微纳系统。因为纳米系统具有微小而且可植入体内等特性,所以它的供电系统必须是小型化的。太阳能是最丰富的能源,然而对于可移动性微纳系统来说,它所处的工作环境并不一定是具有太阳光照的,例如生物传感,隧道的安全检查等。因此太阳能对于微纳系统来说并不一定是最佳选择。然而,我们的生活中,机械能是无处不有、无时不有的。把力学能转换为电能可能是满足微系统的一个途径。

我们小组2005年开始研究如何用纳米结构把机械能转换为电能^[1]。我们首先探索其科学原理。利用竖直结构的氧化锌纳米线的独特性质,在原子力显微镜下研制出将机械能转化为电能的纳米发电机。竖直生长的氧化锌同时具有半导体性能和压电效应。氧化锌纳米线的这种独特结构导致了弯曲纳米线的内外表面产生极化电荷,用导电原子力显微镜的探针弯曲单个氧化锌纳米线,输入机械能,再利用氧化锌的半导体性质将其纳米线的压电特性耦合起来,从而将电能暂时储存在纳米线内,然后再用导电的原子力显微镜探针接通这一电源,向外界输电,从而完美地实现了纳米尺度的发电功能。

2007年我们成功研发出由超声波驱动的可独立工作的直流纳米发电机^[3]。这一突破性的进展,开发出了不依赖于原子力显微镜并能连续不断地输出直流电的纳米发电机的雏形,为技术转化和应用奠定了原理性的基础并迈出了关键性的一步。2008年,我们小组研发出可以利用衣料来实现发电的“发电衣”的原型发电机^[4,5],真正实现了“只要能动,就能发电”^[6]。利用溶液化学方法,将氧化锌纳米线沿径向均匀生长在纤维表面,然后用两根纤维模拟了将低频震动转化为电能的这一过程。为了能够实现电极与氧化锌纳米线之间的肖特基接触,采用磁控溅射在一根纤维表面镀了一层金膜作为电极,而另一根表面是未经处理的氧化锌纳米线。当两根纤维在外力作用下发生相对运动时,表面镀有金膜的氧化锌纳米线像无数原子力显微镜探针一样,同时拨动另外一根纤维上的氧化锌纳米线;所有这些氧化锌纳米线同时被弯曲、积累电荷,然后再将电荷释放到镀金的纤维上,实现了机械能到电能的转换。该研究为实现柔软、可折叠的电源系统(如“发电衣”)等打下了基础。

最近,我们小组设计和制造出了基于竖直氧化

锌纳米线阵列的多层交流发电机和基于水平氧化锌纳米线阵列的多排列交流发电机^[7]。其中,当三层基于垂直氧化锌纳米线阵列的交流发电机相互串联连接时,输入电压提高到了 0.243 V;三层相互并联连接时,输入电流密度提高到了 18 nA/cm²。与此同时,运用低温水热分解的方法,通过巧妙的实验设计和组装,我们成功地在一般的柔性基底上合成出了 700 余列生长方向和晶格取向都完全排列的水平氧化锌纳米线阵列。这些水平纳米线相互串并联连接在一起,在仅仅 0.19%的慢性形变下,将输出电压提高到了 1.26 V。这一突破性进展将极大地推动纳米发电机在纳米科技领域的实际应用。

如上所述,在我们生活的环境中充满了各种各样的能量,我们应该发明能够同时把几种能量转换为电能的复合型发电机。最近,我们就发明了能同时收集太阳能于机械能^[8]和化学能于机械能^[9]的复合器件,从而为充分发挥环境中所具有的能源打开了一新研发领域。

3 纳米发电机的应用前景

纳米发电机的发明可以被视为利用纳米压电发电科学现象到实际应用发展过程中的一个重大里程碑。它能收集周围环境中微小的震动机械能并转变为电能来为其他纳米器件,如传感器、探测器等提供能量。这种震动机械能普遍存在于自然界以及人们日常生活中,如空气或水的流动、引擎的转动、空调或其他机器的运转等引起的各种频率的噪音,人行走时肌肉伸缩能或脚对地的压缩能等。甚至在人体内由于呼吸,心跳或是血液流动带来的体内某处压力的细微变化也有可能带动纳米发电机产生电能。

因此,纳米发电机的发明不仅为实现能源系统的微型化带来了可能,更重要的是它为发展可持续自供型电源和实现自驱动纳米系统奠定了科学和技术基础^[10]。我们的研究贯彻的是从科学到工程、到技术、再到商业化的一条龙研发路线。

纳米发电机的发明被中国两院院士评为 2006 年度世界科学十大科技进展之一;2008 年,被英国 *Physics World* 评选为世界科技重大进展之一;2009 年,被 *MIT Technology Review* 评选为十大新兴技术之一;*Science Watch* 在有关能源和燃料的一刊中重点报道了纳米发电机的过程和重大意义;英国 *New Scientist* 期刊把纳米发电机评为在未来 10~30 年以后可以和手机的发明具有同等重要性和影响的十大重要技术之一;2010 年被 *Discovery* 杂志评为纳米技术中 20 项奇特发现中的两项。美国自然科学基金会 2007 年向总统和国会申请 2008 年 65 亿美元研究经费的前沿总结里,第一条重大研究成果(research that benefits the nation 一栏)就是我们的纳米发电机。

纳米发电机无论在生物医学、环境监测、无线通信、无线传感甚至到个人携带式电子产品等方面都将有广泛的重要应用。这一发明有可能收集机械能,比如人体运动、肌肉收缩、血液流动等所产生的能量;震动能,比如声波和超声波产生的能量;流体能量,比如体液流动、血液流动和动脉收缩产生的能量,并将这些能量转化为电能提供给纳米器件,从而让纳米器件或纳米机器人实现能量自供,自己能持久地运转下去。从大的方面看,纳米发电机所奠定的利用纳米结构来实现机械能转换的科学原理甚至有可能可以应用于大范围的能量收集,例如风能和海浪能等。

参考文献

- 1 Wang Z L, Song J H. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. *Science*, 2006, 312: 242—246
- 2 Wang Z L. Self-powering nanotech. *Sci Am*, 2008, 298: 82—87
- 3 Wang X D, Song J H, Liu J, et al. Direct current nanogenerator driven by ultrasonic wave. *Science*, 2007, 316: 102—105
- 4 Qin Y, Wang X D, Wang Z L. Microfiber-nanowire hybrid structure for energy scavenging. *Nature*, 2008, 451: 809—813
- 5 Yang R S, Qin Y, Dai L M, et al. Flexible charge-pump for power generation using laterally packaged piezoelectric-wires. *Nat Nanotechnol*, 2009, 4: 34—39
- 6 Yang R S, Qin Y, Li C. et al. Converting biomechanical energy into electricity by Muscle/Muscle driven nanogenerator. *Nano Lett*, 2009, 9: 1201—1205
- 7 Xu S, Qin Y, Xu C, et al. Self-powered nanowire devices. *Nat Nanotechnol*, 2010, 5: 366—373
- 8 Xu C, Wang X D, Wang Z L. Nanowire structured hybrid cell for concurrently scavenging solar and mechanical energies. *J Am Chem Soc*, 2009, 131: 5866—5872

- 9 Hansen B J, Liu Y, Yang R S, et al. Hybrid nanogenerator for concurrently harvesting biomechanical and biochemical energy. *ACS Nano*, doi: 10.1021/nn100845b
- 10 Wang Z L. Towards self-powered nanosystems: From nanogenerators to nanopiezotronics. *Adv Funct Mat*, 2008, 18: 3553—3567

本文基于作者今年发表在《科技发展报告》的短文发展而成

Sustainable self-sufficient power source for micro/nano-systems: A new field in energy research

WANG ZhongLin^{1,2}

¹Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0245, USA;

²Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Ever since the wide range applications of laptop computers and cell phones, seeking of power sources for driving portable electronics is becoming increasingly important. The current technology mainly relies on rechargeable batteries. But for the near future, micro/nano-systems will be widely used in health monitoring, infrastructure and environmental monitoring, internet of things and defense technologies; the traditional batteries may not meet or may not be the choice as power sources for the following reasons. To meet these technological challenges, the author proposed the self-powering nanotechnology in 2005, aiming at harvesting energy from the environment to power the micro/nano-systems based sensor network. This article is to introduce the nanogenerator as a sustainable self-sufficient power source for micro/nano-systems.

self-powering nanotechnology, nanogenerator, self-sufficient power source for micro/nano-systems, sensor network, internet of things

doi: 10.1360/972010-1295