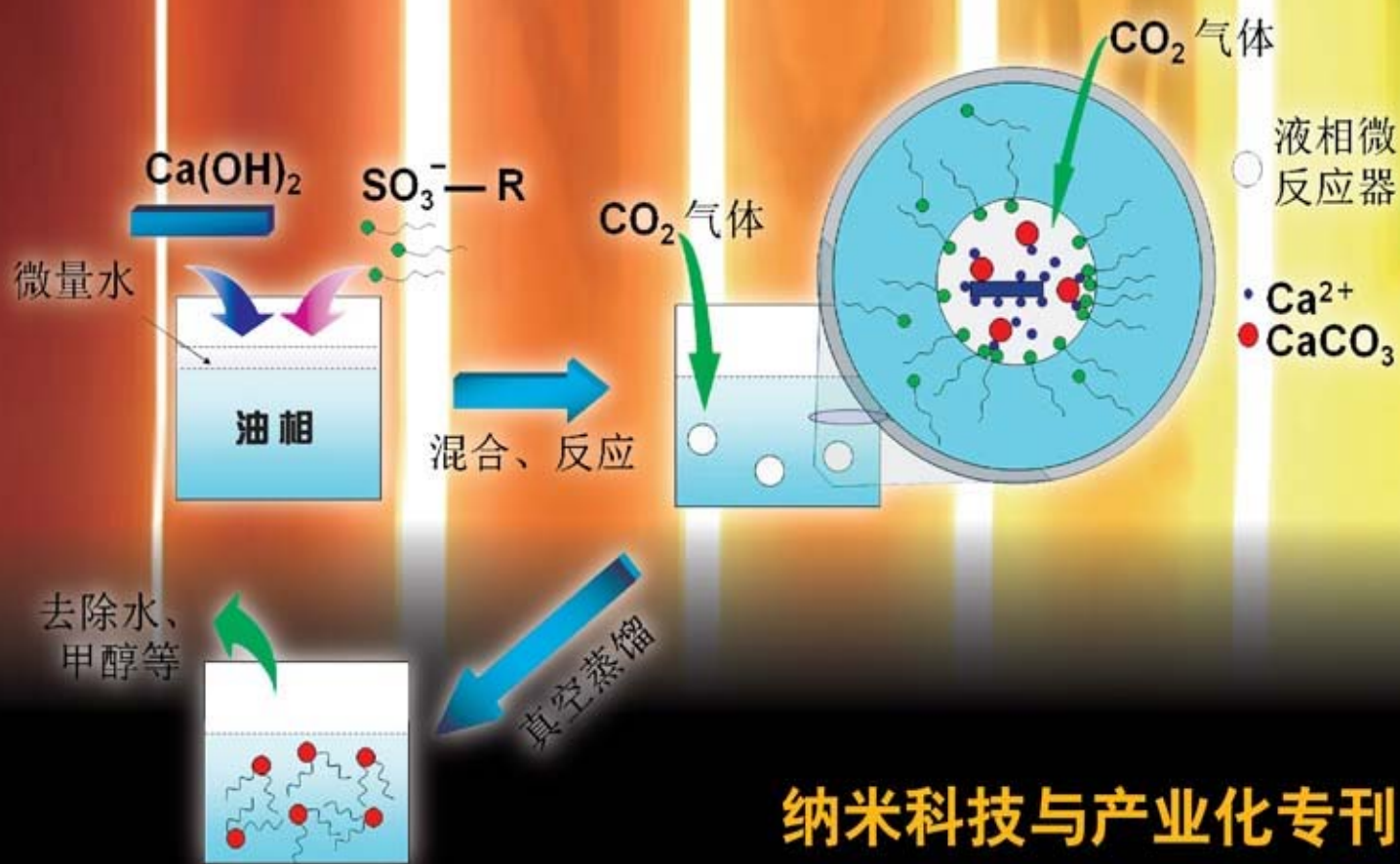


SCIENTIA SINICA Chimica

中国科学 化学

第43卷 第6期 2013年6月 627-782

ISSN 1674-7224 CN 11-5838/O6



纳米科技与产业化专刊

中国科学院 主办
国家自然科学基金委员会



科学与技术
前沿论坛专刊

《中国科学》《科学通报》

荣誉总主编：周光召 总主编：朱作言

《中国科学：化学》编辑委员会

主 编：万立骏 中国科学院化学研究所

副主编：曹 镛 华南理工大学材料科学与工程学院 陈洪渊 南京大学化学化工学院 冯守华 吉林大学化学学院

李亚栋 清华大学化学系 林国强 中国科学院上海有机化学研究所

田 禾 华东理工大学化学与分子工程学院 田中群 厦门大学化学化工学院 薛子陵 University of Tennessee, USA

编 委：

无机化学

卜显和	南开大学化学学院	陈小明	中山大学化学与化学工程学院	高 松	北京大学化学与分子工程学院
郭子建	南京大学化学化工学院	洪茂椿	中国科学院福建物质结构研究所	刘 俊	Pacific Northwest National Laboratory, USA
任咏华	香港大学化学系	熊仁根	东南大学化学化工学院	张洪杰	中国科学院长春应用化学研究所
郑南峰	厦门大学化学化工学院	左景林	南京大学化学化工学院		

有机化学

丁奎岭	中国科学院上海有机化学研究所	黄培强	厦门大学化学化工学院	黄 震	Georgia State University, USA
蒲 林	University of Virginia, USA	索祖才	The Ohio State University, USA	王梅祥	清华大学化学系
席 真	南开大学化学学院	谢作伟	香港中文大学化学系	姚祝军	南京大学化学化工学院
张德清	中国科学院化学研究所	张礼和	北京大学医学部药学院	赵玉芬	厦门大学化学化工学院

高分子科学

安立佳	中国科学院长春应用化学研究所	陈国平	National Institute for Materials Science, Japan	高长有	浙江大学高分子科学与工程系
管治斌	University of California, Irvine, USA	李永舫	中国科学院化学研究所	乔金樑	中国石油化工股份有限公司北京化工研究院
唐本忠	香港科技大学化学系	汤华荣	Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia	杨 柏	吉林大学化学学院
宛新华	北京大学化学与分子工程学院				

物理化学

包信和	中国科学院大连化学物理研究所	韩布兴	中国科学院化学研究所	胡培君	Queen's University, UK
梁文平	国家自然科学基金委员会	刘智攀	复旦大学化学系	刘忠范	北京大学化学与分子工程学院
帅志刚	清华大学化学系	王 树	中国科学院化学研究所	王 野	厦门大学化学化工学院
杨学明	中国科学院大连化学物理研究所	张劲松	University of California, Riverside, USA	张金中	University of California, Santa Cruz, USA
赵新生	北京大学化学与分子工程学院	庄 林	武汉大学化学与分子科学学院		

分析和环境化学

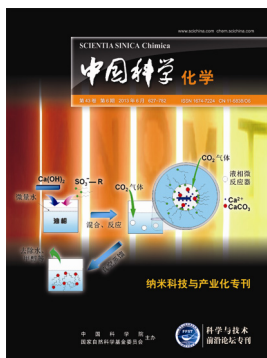
C. Amatore	Ecole Normale Supérieure, France	柴之芳	中国科学院高能物理研究所	陈 义	中国科学院化学研究所
R. Compton	University of Oxford, UK	鞠焯先	南京大学化学化工学院	乐晓春	University of Alberta, Canada
林金明	清华大学化学系	邵元华	北京大学化学与分子工程学院	谭蔚泓	湖南大学化学化工学院
汪海林	中国科学院生态环境研究中心	杨芾原	复旦大学生物医学研究院	张玉奎	中国科学院大连化学物理研究所
赵进才	中国科学院化学研究所	赵宇亮	国家纳米科学中心	朱 彤	北京大学环境科学与工程学院

化学工程

段 雪	北京化工大学理学院	何鸣元	中国石化石油化工科学研究院	陆小华	南京工业大学化学化工学院
骆广生	清华大学化学工程系	聂书明	Georgia Institute of Technology and Emory University, USA	孙立成	Royal Institute of Technology, Sweden
徐春明	中国石油大学(北京)	张锁江	中国科学院过程工程研究所	张 涛	中国科学院大连化学物理研究所

编辑部主任：朱晓文

责任编辑：宋冠群 许军舰 张学梅



封面说明 纳米颗粒分散是无机纳米材料在有机体系中发挥纳米效应实现实际应用的关键. 纳米分散体是继纳米粉体之后的第二代新型纳米材料, 它是指纳米颗粒稳定、均匀地单分散于液体介质中而形成的透明液相分散体, 是单分散性优异的基础纳米材料. 本文发明了超重力原位一步和分步反应-萃取相转移法制备纳米颗粒液相透明分散体的新方法, 创制了高固含量的金属、金属氧化物等系列纳米分散体产品; 提出了采用基于纳米分散体制备高透明有机无机纳米复合材料的新方法, 实现了纳米分散体和高透明纳米复合节能膜的产业化和商业应用, 为我国建筑节能提供了一种重要的新材料. (见本期论文: 曾晓飞, 王琦安, 王洁欣, 沈志刚, 陈建峰. 纳米颗粒透明分散体及其高性能有机无机复合材料. p629~640)

纳米科技与产业化专刊

· 前言 ·

宋延林 王晓平

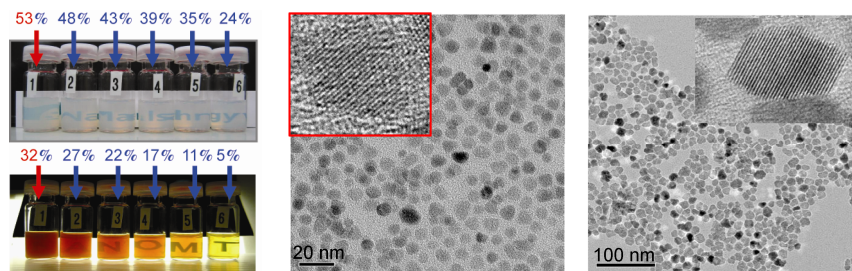
中国科学:化学, 2013, 43(6): 627-628

评述

纳米颗粒透明分散体及其高性能有机无机复合材料

曾晓飞, 王琦安, 王洁欣, 沈志刚, 陈建峰

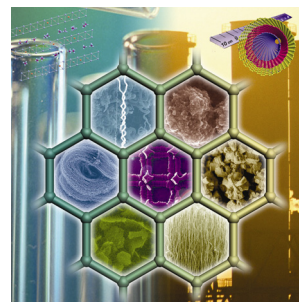
中国科学:化学, 2013, 43(6): 629-640



碳纳米管的宏量制备及产业化

张强, 黄佳琦, 赵梦强, 骞伟中, 魏飞

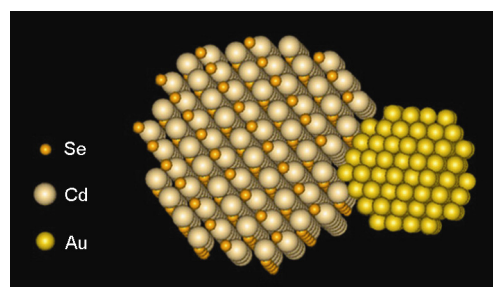
中国科学:化学, 2013, 43(6): 641-666



金属-半导体异质结构纳米晶的可控制备和光谱调控

陈胜, 何旭东, 何嵘, 曾杰

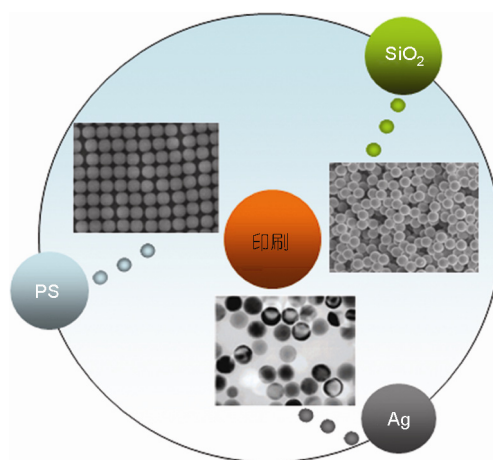
中国科学:化学, 2013, 43(6): 667-676



纳米粒子的制备及其在打印印刷领域的应用

辛智青, 王思, 李凤煜, 张兴业, 张志良, 宋延林

中国科学:化学, 2013, 43(6): 677-686



光伏太阳能电池生产过程中的污染问题

卢兰兰, 毕冬勤, 刘壮, 杨春雷, 肖旭东

中国科学:化学, 2013, 43(6): 687-703

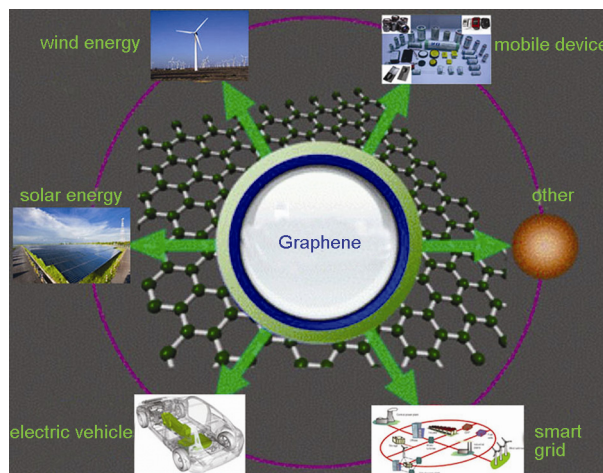
归一化后的各电池 GHG 气体的排放速率

GHG (CO ₂ -eq) 释放速率	单晶硅	多晶硅	非晶硅	CdTe	CIGS	DSSC
V ₁ (kg/m ²)	12.84	11.52	6.8	6.4	7.8	5.44
V ₂ (g/kW h)	41.96	42.36	57.4	37.64	38.2	45.7

面向能源领域的石墨烯研究

陈冠雄, 谈紫琪, 赵元, 倪彬彬, 朱彦武, 陆亚林

中国科学:化学, 2013, 43(6): 704-715



铜铟镓硒太阳能电池的机遇与挑战

刘壮, 罗海林, 杨春雷, 肖旭东

中国科学:化学, 2013, 43(6): 716-724



纳米技术在高性能电力复合绝缘材料中的工程应用

张冬海, 张晖, 张忠, 陈运法

中国科学:化学, 2013, 43(6): 725-743



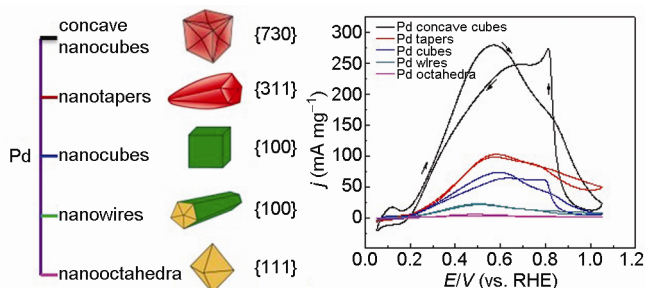
论文

钯纳米晶体在电催化甲酸氧化反应中的形貌效应

王成名, 柏彧, 王利利, 龙冉, 刘东,

邓明森, 熊宇杰

中国科学:化学, 2013, 43(6): 744-753

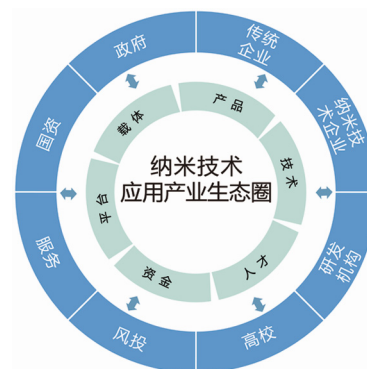


信息交流

探索战略性新兴产业发展模式, 推动纳米技术应用产业发展

张希军

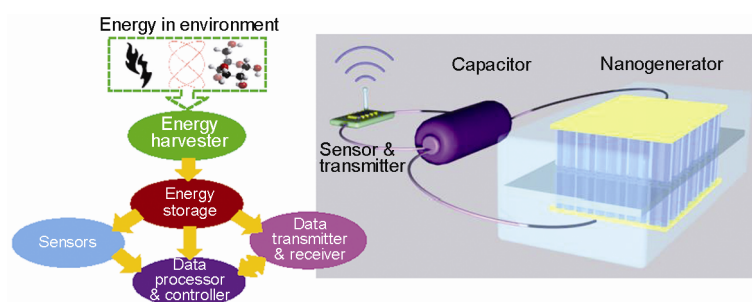
中国科学:化学, 2013, 43(6): 754-758



纳米发电机作为可持续性电源与有源传感器的商业化应用

王中林

中国科学:化学, 2013, 43(6): 759-762

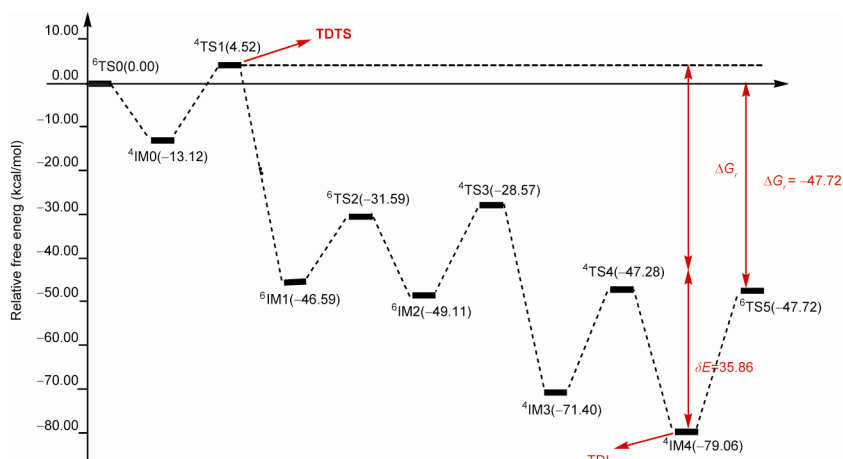


论文

Fe⁺(⁶D)催化 N₂O 和 CH₄ 制取甲醇循环反应的理论探究

甘延珍, 王永成, 金燕子, 王环江, 耿志远, 王翠兰, 吕玲玲

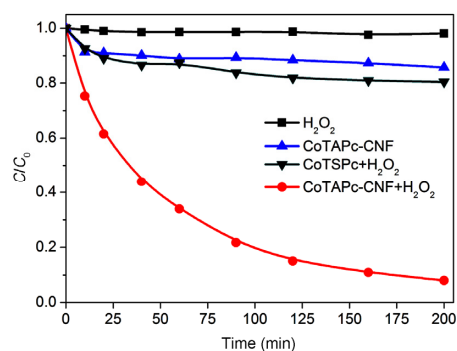
中国科学:化学, 2013, 43(6): 763-773



碳纳米纤维增强钴酞菁催化氧化染料的性能研究

李楠, 卢琴, 高美萍, 吕汪洋, 姚玉元, 陈文兴

中国科学:化学, 2013, 43(6): 774-782





纳米发电机作为可持续性电源与有源传感器的商业化应用

王中林^{①②*}^① 佐治亚理工学院材料科学与工程系, 亚特兰大 30332, 美国^② 中国科学院北京纳米能源与系统研究所, 北京 100083

*通讯作者, E-mail: zlwang@gatech.edu

收稿日期: 2012-11-23; 接受日期: 2013-01-18; 网络版发表日期: 2013-04-27
doi: 10.1360/032013-76

摘要 纳米发电机属国际首创, 拥有自主知识产权, 将带来新能源领域划时代的突破, 为中国科技创新发展提供技术引领和科技支撑. 本文简述了其作为可持续电源与有源传感器的应用前景.

关键词
纳米发电机
压电效应
摩擦起电效应
有源传感器

1 引言

我们生活的环境中充满了各种各样的能量, 如震动能、形变能、肌肉活动能、化学能、生物能、微风能、太阳能和热能等. 利用纳米技术可以将这些能量转换为电能来带动一些小型的电子器件, 进而制造出自驱动的微纳系统. 在日常生活中, 机械能无处不有, 因此可以通过将力学能转换为电能, 为电子器件供应电源. 因此, 利用环境中的机械能, 将是解决目前对可持续性自驱动电源需求的一个最优方案.

自手提电脑和手机等个人便携式电子产品普及后, 解决小范围的用电问题显得尤为重要. 目前的技术解决方式是以蓄电池为主. 但蓄电池技术有着自身的局限性, 如供电的持久性差、对环境污染严重和材料资源消耗大等, 无法满足个人便携式电子产品日益发展的需求. 并且在不久的将来, 随着微纳系统的发展, 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

法将不能满足传感器网络的工作环境和需求. 因此, 大力开发纳米级可持续性自驱动电源技术, 寻求产业上的突破, 解决便携式电子产品和微纳系统发展对可持续性自驱动电源的需求将是未来科技产业发展的一个重心.

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. 这些应用的共同点是基于许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传感器能够独立工作的情况下才能实现, 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. 因此, 可以利用它处于待机状态(standby mode)的较长时间从环境中收集能量并储存起来, 而在暂短的收发状态(active mode)用收集的能量将信号传递出去.

便携式电子产品、微纳系统、物联网传感器及国防科技的发展为可持续性自驱动电源技术带来了广阔的市场需求. 据统计, 目前全球市场的年需求约为1000亿美元, 并且在今后的10年, 对可持续性自驱动电源技术的需求还会有一个快速的增长. 其中, 便

携式电子电源(如手机、电脑和其他移动电子器件)市场年需求为 300 亿美元, 占市场总需求的 30%, 并且便携式电子电源的需求年均增长率超过 50%, 纳米发电机技术将为便携式电子提供一个可行的自驱动电源方案; 另外, 整合了自驱动电源的微纳系统和物联网传感器, 市场年需求达到 620 亿美元, 传感器的市场需求年增长率超过 30%, 微纳系统属于上升期的朝阳行业, 待市场成熟后, 对自驱动电源的需求将会有个爆炸性的井喷; 余下的市场需求来自于与纳米技术相关的生物器件和国防相关技术发展。

2 纳米发电机作为功率源

2.1 压电型纳米发电机

自 2005 年开始, 本研发团队致力于将机械能转化为电能的可持续性自驱动电源的开发, 这一技术称为纳米发电技术。2006 年, 本研发团队首先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^[1]。在这一工作中, 利用竖直生长的氧化锌纳米线的压电效应, 将原子力显微镜输入的机械能转化为电能, 同时利用原子力显微镜的导电探针向外界输电, 完美地实现了纳米尺度的发电功能; 在此基础上, 2007 年成功首次研发出由超声波驱动的、可独立工作的^[2]、能连续不断输出直流电的纳米发电机, 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, 进一步研发出可以利用衣料纤维来实现发电的“发电衣”的原型发电机^[3], 真正实现了“只要能动, 就能发电”。该研究为将来开发柔软、可折叠的电源系统打下了基础; 2009 年, 设计和制造出了基于竖直/水平氧化锌纳米线阵列的多层/多排交流发电机, 将发电系统的输入电流密度提高到了 18 nA/cm^2 , 输出电压提高到了 1.26 V, 接近并达到传统电池的输出电压, 这一突破为纳米发电机在传统电子元件中的应用提供了可行性方案^[4], 将极大地推动纳米发电机在便携式电子产品中的实际应用; 2010 年, 本研发团队成功地用这一纳米压电发电技术驱动了市场上购买的半导体激光器、LED 和液晶 LCD 等电子元件^[5, 6], 展示了以纳米发电机为基础的可持续性自驱动电源商业化应用的广泛前景; 2011 年, 压电纳米发电机的输出电压达到 50 V, 电流高达 100 μA , 可以直接用来驱动一般的小型电子产品^[7]。

2.2 摩擦型纳米发电机

摩擦电和静电现象是一种非常普遍的现象, 存在于日常生活中从走路到开车等各个层面。由于它很难被收集和利用, 往往是被人们所忽略的一种能源形式。如果可以通过一种新的方法收集摩擦产生的电能或者利用该方法将日常生活中不规则的动能转化成可以利用的电能, 将产生重要影响。截止到目前为止, 静电微型发电机已被研制成功, 并且在微机电(MEMS)领域得到广泛应用。但是, 微型静电发电机的设计主要以无机硅材料为基础, 并且器件的制造需要复杂的工艺和精密的操作。整个装置的制备需要大型的仪器设备和特殊的生产条件, 造价成本过高, 不利于发电机的商业化和日常应用。最近, 本研发团队利用摩擦起电和静电感应的原理, 成功研制出柔性摩擦电发电机以及基于该原理的透明摩擦电发电机兼高性能压力传感器^[8, 9]。

整个摩擦电发电机则依靠摩擦电电势的充电泵效应, 将两种镀有金属电极的高分子聚合物薄膜——聚酰亚胺(kapton)膜和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)膜贴合在一起组成器件, 在外力作用下器件产生机械形变, 导致两层聚合物膜之间发生相互摩擦, 从而产生电荷分离并形成电势差。而两个金属极板作为发电机的电能输出端, 通过静电感应可以在表面生成感应电荷。感应电荷在摩擦电电势驱动下流经外电路即可形成电流。对于仅 3 cm^2 大小的单层摩擦纳米发电机, 其输出电压可以高达 200~1000 V, 输出电流为 100 μA , 可以瞬时带动几百个 LED 灯、无线探测和传感系统、手机电池充电等^[10, 11]。

摩擦电发电机有以下几个独特的优势: (1) 摩擦电发电机是一种以新颖的原理和方法为基础的新型发电机, 由于其全高聚物的结构特性, 它很可能会为有机电子器件和柔性电子学的研究和应用开辟新的研究领域; (2) 整个器件的制造工艺不需要昂贵的原材料和先进的制造设备, 这有利于大规模工业生产和实际应用; (3) 整个器件以柔性聚合物膜为基本结构, 易加工, 器件的使用寿命长, 并且容易和其他加工工艺集成。摩擦电发电机展示出良好的应用前景, 可以从人类活动、轮胎转动、海浪和机械振动等众多不规则活动中获得能量, 可为个人电子产品、环境监测、医学科学等提供自供电和自驱动设备, 有着巨大的商用和实用潜力。

3 纳米发电机作为主动型有源传感器

传感器产业也是国际公认的具有发展前途的高技术产业, 其以技术含量高、经济效益好、渗透能力强、市场前景广等特点成为发达国家竞争的焦点. 就世界范围而言, 传感器市场上增长最快的是汽车市场, 占第二位的是过程控制市场, 而通讯市场是最具前景的需求增长点. 另外, 随着物联网的发展, 移动终端市场对灵敏实效的传感器需求也将日益增大.

纳米发电机可以作为一主动式传感器, 因为其产生的电信号和其所受的压强及压强变化速率有直接的关系, 因此, 它在不需要任何外界电源的情况下可以直接感知所加的压力. 这就是主动型有源传感器, 是新一代的传感技术. 本研发团队已经开发出利用纳米发电机来测试血压、气体/液体流动速度、汽车速度和流量检测、震动测量等的方法. 这种不需要外界提供电源的传感器将开辟一片新的研发领域.

4 结论

纳米发电机的发明可以被视为从科学现象到实际应用发展过程中的一个重大里程碑, 可取代传统的蓄电池技术作为多种便携电子器件和微纳器件的自驱动电源设备. 比起当前的蓄电池技术, 纳米发电

机有多项优点: (1) 纳米发电机不需要使用重金属, 使其非常环保, 不易造成环境污染; (2) 纳米发电机可以由与生物体兼容的材料制备而成, 嵌入到人体内也不会对健康造成伤害, 可作为将来纳米生物器件的组成部分; (3) 纳米发电机加工能耗非常低. 我们预计在三五年内, 就可以将纳米发电机真正应用在保健设备、个人电子产品以及环境监测设备方面, 进而应用于生活的各个方面^[11].

因为其重要科技意义及实用价值, 自问世以来, 纳米发电机的技术一直受到世界的广泛关注和高度评价. 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 Scientists* 期刊将纳米发电机评为在未来 10 到 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中, 第一条重大研究成果(Research that benefits the nation 一栏)就是本研发团队的纳米发电机.

参考文献

- 1 Wang ZL, Song JH. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. *Science*, 2006, 312: 242–246
- 2 Wang XD, Song JH, Liu J, Wang ZL. Direct current nanogenerator driven by ultrasonic wave. *Science*, 2007, 316: 102–105
- 3 Qin Y, Wang XD, Wang ZL. Microfiber-nanowire hybrid structure for energy scavenging. *Nature*, 2008, 451: 809–813
- 4 Xu S, Qin Y, Xu C, Wei YG, Yang RS, Wang ZL. Self-powered nanowire devices. *Nat Nanotech*, 2010, 5: 366–373
- 5 Zhu G, Yang RS, Wang SH, Wang ZL. Flexible high-output nanogenerator based on lateral ZnO nanowire array. *Nano Lett*, 2010, 10: 3151–3155
- 6 Hu YF, Zhang Y, Xu C, Zhu G, Wang ZL. High output nanogenerator by rational unipolar-assembly of conical-nanowires and its application for driving a small liquid crystal display. *Nano Lett*, 2010, 10: 5025–5031
- 7 Zhu G, Wang AC, Liu Y, Zhou YS, Wang ZL. Functional electrical stimulation by nanogenerator with 58 V output voltage. *Nano Lett*, 2012, 12: 3086–3090
- 8 Fan F, Tian ZQ, Wang ZL. Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 2012, 1: 328–334
- 9 Wang SH, Lin L, Wang ZL. Nanoscale-triboelectric-effect enabled energy conversion for sustainably powering of portable electronics. *Nano Lett*, 2012, 12: 6339–6346
- 10 Zhu G, Pan CF, Guo WX, Chen CY, Zhou YS, Yu RM, Wang ZL. Triboelectric-generator-driven pulse electrodeposition for micro-patterning. *Nano Lett*, 2012, 12: 4960–4965
- 11 王中林. 自驱动系统中的纳米发电机. 北京: 科学出版社, 2012

Commercial applications of nanogenerators as sustainable power source and active sensors

WANG ZhongLin^{1,2*}

1 School of Materials Science and Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA

2 Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosciences, Chinese Academy of Science, Beijing 100083, China

*Corresponding author (email: zlwang@gatech.edu)

Abstract: Nanogenerator is an original invention with fully covered intellectual properties, which is to bring a revolutionary development in energy science. This paper gives a brief overview about its commercial potential as a sustainable power source and active sensor.

Keywords: nanogenerator, piezoelectric effect, triboelectric effect, active sensors

中国科学化学

SCIENTIA SINICA Chimica

第 43 卷 第 6 期 2013 年 6 月出版

变更声明

本刊自 2010 年起, 中文版刊名由《中国科学 B 辑: 化学》变更为《中国科学: 化学》(对应的外文名称为: *SCIENTIA SINICA Chimica*); 英文版刊名由 *Science in China Series B: Chemistry* 变更为 *SCIENCE CHINA Chemistry*.

中文版 ISSN 号由 ISSN 1006-9240 变更为 ISSN 1674-7224; CN 号由 CN 11-1788/N 变更为 CN 11-5838/O6.

英文版 ISSN 号由 ISSN 1006-9291 变更为 ISSN 1674-7291; CN 号由 CN 11-1789/N 变更为 CN 11-5839/O6.

特此声明.

地 址: 北京东黄城根北街 16 号
电 话: (010) 64016732 (编辑部)
(010) 64019709 (发行部)
(010) 64008316 (广告部)
传 真: (010) 64016350

邮政编码: 100717
电子信箱: chemistry@scichina.org (编辑部)
sales@scichina.org (发行部)
ads@scichina.org (广告部)

版权所有, 未经许可, 不得转载

主 管 中 国 科 学 院
编 辑 中 国 科 学 院
《中国科学》编辑委员会
北京(100717)东黄城根北街 16 号
主 编 万 立 骏

出 版 《中国科学》杂志社
印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行处 北京报刊发行局
订 购 处 全国各邮电局
《中国科学》杂志社发行部

刊号: $\frac{\text{ISSN } 1674-7224}{\text{CN } 11-5838/O6}$ 代号: $\frac{\text{国 外 BM40B}}{\text{国内邮发 } 80-202}$

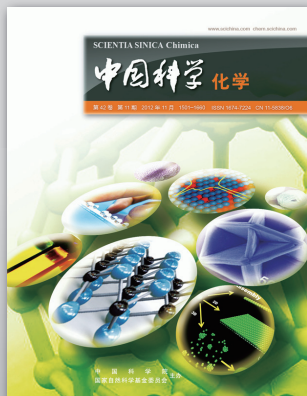
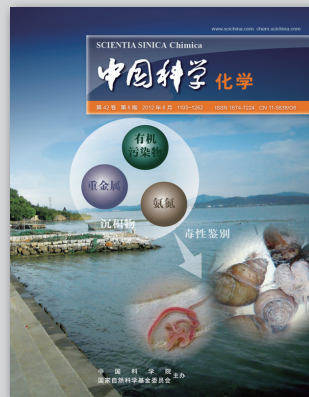
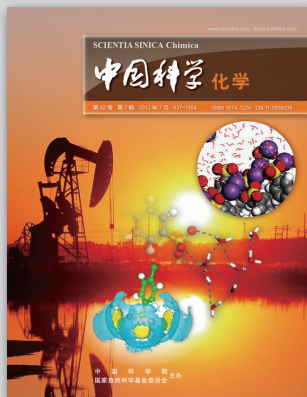
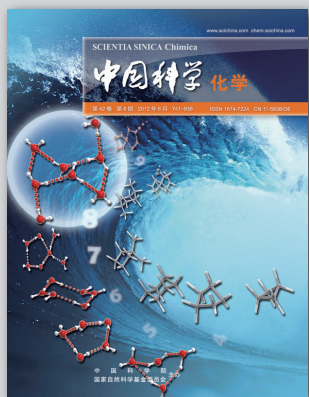
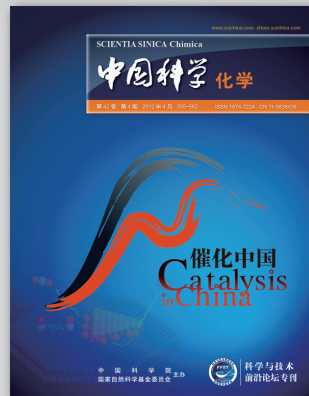
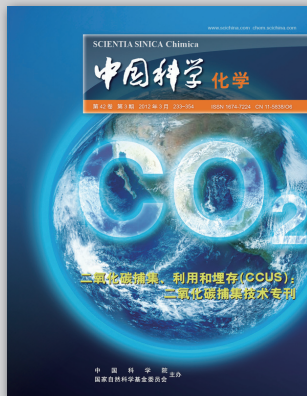
每期定价: 128.00 元 全年定价: 1536.00 元

广告经营许可证: 京东工商广字第 0429 号



2012年封面

主编：万立骏（中国科学院化学研究所）



主办单位：中国科学院 国家自然科学基金委员会

SCIENCE CHINA PRESS

