

· 学科进展与展望 ·

纳米发电机的发明和纳米压电电子学的创立

——专访美国佐治亚理工学院王中林教授

本刊编辑部

想象这样一种情景:自动化工业时代之初,全世界的高级技术工程师和企业家都纷纷开始设计制造客车、公共汽车、卡车、摩托车以及其他各种可以想到的机动化交通工具,但却没有人首先研制用以驱动它们的发动机?!而这正是纳米技术产业自从产生以来所面临的问题:在设计和制造纳米尺度的传感器等器件方面,以及在微机电系统方面取得了长足进展,却没有考虑先研发给这些纳米器件提供能量的微型功率源——纳米发电机。

4年前,美国佐治亚理工学院的王中林教授研究解决了这一纳米技术领域的关键问题,他在 *Science* 周刊上发表的一篇文章中描述了一种压电纳米发电机,可以将周围环境中的机械能、振动能或水力能量转化为电能来驱动纳米器件 (*Science*, 2006, 312: 242—246, 被引 342 次)。该文稳居国际化学界排行前 10。继该项发明后,他领导的研究组 2007 年发明超声波驱动的直流纳米发电机 (*Science*, 2007, 316: 102—105), 2008 年初发明纤维纳米发电机 (*Nature*, 2008, 451: 809—813) 和 2009 年初发明了高分子薄膜封装的交流纳米发电机 (*Nature Nanotechnology*, 2009, 4: 34—39), 王中林教授是当之无愧的纳米发电机的先驱。纳米发电机的发现被中国的两院院士评为 2006 年世界科学十大发现之一。纤维纳米发电机被英国《物理世界》评为 2008 年重大进展之一^[1] 和被评为 2008 年中国十大科学发现之一。英国《新科学家》期刊把纳米发电机评为影响未来、10—30 年以后有可能和手机的发明具有同等重要性的十大重要技术之一^[2]。王教授首创的这些领域和学科在未来的科学和技术将有不可估量的重要性和应用价值。他这一系列工作高居世界化学和材料界近年来最高引用论文之列。王中林教授发表的出版物中有 60 多篇文章每篇被引用达 100 次以上,他论文被引用的总次数超 27 000 次, H

因子高达 78。 *Science Watch* 在有关能源和燃料的一刊中重点报道了王中林教授发明纳米发电机的过程和重大意义^[3]。2007 年,王中林教授首创了纳米压电电子学 (Nano-piezotronics) 的全新研究领域^[4,5], 有机地把压电效应和半导体效应在纳米尺度结合起来。纳米发电机和纳米压电电子学被 *MIT Technology Review* 评为 2009 年十大新兴技术之一^[6]。

王中林教授是美国佐治亚理工学院 (Georgia Institute of Technology) 的董事讲席教授和工学院杰出讲席教授^[7]。他近日接受了本刊编辑的专访。

编辑:直到 20 世纪 90 年代末您才开始进入纳米技术领域,在这之前您的工作主要集中在哪个方面,是什么促使您转换方向?

王中林:1987 年我从亚利桑那州立大学博士毕业以后,在物质与电子交互作用这一基础物理领域里工作了很长时间,主要从事弹性和非弹性散射理论的研究。我还从事反射电子的表面成像分析,1995 和 1996 年写的两部专著就是这一方面的。另外,我也在高温超导方面进行了很长时间研究工作。我决定转到纳米技术领域是因为我意识到我所从事的理论的局限性——我们的研究不会有太大影响,我需要寻找一个新的领域能够施展我的才能,使我能够有很高的影响力。这促使我将全部时间投入于纳米技术领域。我在学生时代就从事透射电子显微镜研究,总是观测原子和极小尺度表面,因而转向纳米技术是一个很自然的选择。

编辑:请问您是怎么开始纳米科技研究的? 您的主要的突破性工作有哪些?

王中林:我于 1982 年考取中美联合招收的研究生,1983 年—1987 年在亚历山那州立大学读物理学博士,博士论文做的就是纳米方面的。当时不叫纳米,而叫“small particle”,小颗粒。我当时主要是研

究“小金属颗粒表面的催化反应过程”。当时叫小颗粒,现在就叫纳米颗粒。所以,可以说我是1983年开始做纳米科技研究的。博士论文作完以后,我没有全力以赴去做这个事情。直到1995年,我到佐治亚理工学院任教的时候,全力以赴地做这方面的工作。从1994年算起到现在,已经15年了。我们在这期间做过一些意义重大的研究和发明:

第一个重大研究:我们是最早做纳米颗粒自组装结构的小组之一。我们在1995年、1996年发表文章,引用率相当高。纳米颗粒自组装后来成为化学界、材料界很普遍的一个技术。

第二个开创性研究:我们对碳纳米管的贡献。我们发明并开创了一系列研究单根碳纳米管力学性能、电学性能、场致发射性能的一些技术。我们的技术是利用原位透射电子显微镜来研究单个纳米管/线的物性(*Science*, 1999, 283: 1513—1516; *Science*, 1998, 280: 1744—1746)。这在当时是世界上首创。现在有很多人在做这方面的研究,并成为了一新领域:纳米原位测量。您可能还记得当年“纳米秤”的概念吧。

第三个开创性研究:我们开辟了氧化物纳米结构的研究新领域。我们是1999年开始的,2001年我们的科学文章发表(*Science*, 2001, 291: 1947—1949)。这篇文章是开创氧化物纳米结构研发的首篇开领域之作,已被引用2500次。

第四个开创性研究:我们3年前研究利用氧化物的极性面,也就是带电的面,来诱导的一系列的新的生长结构(*Science*, 2004, 303: 1348—1351, 被引511次; *Science*, 2005, 309: 1700—1704, 被引253次)。在氧化锌极性面导致生长现象方面,我们是世界首创,而且是我们提出了一系列模型来理解这个生长过程。所以,不论是实践,还是在理论上我们都是先驱者。

第五个开创性研究:是纳米发电机的发明和纳米压电电子学的创立。这是我今天要讲述的主题。

编辑:王教授可以说是当之无愧的直接原位表征纳米结构的先驱。您最初是怎样进入这个领域的?开始时您的工作是什么?

王中林:1995年我进入这个领域的时候,人们刚开始做纳米粒子的自组装,例如金、银等金属粒子,所以我就做这些。我研究如何控制自组装纳米粒子的形状,同时也研究碳纳米管。此间我发明了原位表征纳米材料的方法,我将纳米管放在透射电镜内的一种样品台上,在直接成像的同时测量纳米

管的各种物理性质。当时许多研究者测量时看不到他们的待测样品,因而只能根据他们推论的模型去解释测量结果。应用我的技术,可以在直接确定结构的同时直接确定其物理性质。结构和特性是一一对应的关系。这一工作发表在在了 *Science* 上(*Science*, 199, 283: 1513, 被引737次),也从此开辟了一个新的研究领域——原位纳米力学。1997—2000年间,我的主要精力放在这一方面的工作。

编辑:是什么促使您在2000年的时候迅速地改变了研究方向?

王中林:我在碳纳米管这个方向上工作了三四年后,就开始思索这种纳米结构究竟能有多大电子学方面的应用前景?纳米管是金属还是半导体取决于其螺旋手性,由于当时人们很难控制纳米管的空间螺旋性,它的导电属性常常是随机的出现。即使今天这仍是困扰人们的问题。所以我当时在想为什么不开始用氧化物?后来我大多数的工作都集中在氧化锌上。

编辑:为什么氧化锌才能成为制作纳米结构与器件的理想化合物?

王中林:氧化锌的性质很有意思。首先,它们有很容易控制的结构。氧化锌是半导体,具有压电性,即可以将机械信号转化为电信号或将电信号转化为机械信号,并且具有可控的形貌、取向和结构。这些特性使得许多应用易于实现。我们九年来集中研究氧化锌,因为它有许多非常有用的属性:首先,氧化锌是光学透明的宽禁带半导体;它的第二个优点是同时具有半导体性质和压电性;第三个优点是氧化锌的纳米结构可以在50—80℃的相对较低温度下合成,用化学烧杯就可以在任意形状的衬底上生长;还有,氧化锌具有生物相容性,也就是说对生物体是安全的,不会引起环境问题,是绿色材料。所有这些使氧化锌具有做许多非常创新的研究工作所需要的所有特性。

编辑:王教授您2001年报道纳米带的文章(*Science*, 2001, 291: 1947—1949)是世界材料领域10年来引用最高的10篇文章之一,它被引用了2500次,您可以说是当之无愧的研究氧化物纳米带及其他纳米尺度结构的先驱。为什么氧化锌这么重要?

王中林:氧化锌是一极其重要的材料。根据英国《物理世界》2008年10月刊登的一篇“物理的地图”(map of physics)一文,在物理范畴,氧化锌纳米材料是和暗物质,量子计算,半导体薄膜,碳纳米管

等具有同等重要的地位和影响。2008年全世界发表的有关氧化锌纳米结构方面的文章就超过了600余篇。我们2001年发表的氧化锌纳米带一文(*Science*, 2001, 291: 1947—1949)正是所有这些研究的开创篇。氧化锌的应用覆盖了光电, 发光, 传感, 能源和医学等。

编辑: 如果氧化锌这么有用, 为什么当时很多其他人没有进行这方面研究?

王中林: 当时大家都将注意力集中在碳纳米管上, 你需要足够的勇气转换方向到一个全新的领域。我们是完全舍弃了碳纳米管这个方向而开始做氧化物的。现在看来, 当时的决定显然是正确的, 但在那个时候谁也没办法保证。现在氧化锌是研发的热点材料。

编辑: 您是怎么想到做纳米发电机和自功率纳米器件的?

王中林: 纳米科学界对纳米材料合成和应用的研究方兴未艾。尤其是当今最前沿的纳米器件的研究, 纳米器件有尺寸微小(纳米量级), 功耗小, 反映灵敏具有宏观器件完全所不具有的独特优势。但是目前的研究只是集中在纳米器件的本身, 没有考虑输入给这些纳米器件的电源问题。如果真正能让这些微小器件工作起来, 电源是必须的。为了保持纳米系统微小而且体内可植入等特性, 小型化的供电系统是必不可少的。只有实现了自带电源的纳米器件才可视为真正的纳米系统。这无论在生物医学, 军事, 无线通信, 无线传感方面都具有广泛的重要应用。

研制最新的无线纳米器件, 无线纳米系统对于实时同步内置生物传感器和生物医药监控, 生物活体探测具有重大的意义。任何生物体内置的无线传感器都需要电源, 一般的来说, 这些传感器的电源都是直接或者间接来源于电池。如果这些传感器能从生物体内自己给自己提供电源, 并且实现器件和电源的同时小型化是科学家们一直所梦寐以求的。我们一直在做氧化物纳米带和纳米线的生长, 试图研究其基本科学原理。2004年的时候我在想所有这些研究设计缺少某个环节。我们生长出了各种各样的纳米结构, 大家都在做纳米材料和纳米器件, 但我们怎样给这些如此之小的器件提供功率? 也许我们应该想法制造自驱动的纳米器件。而我们怎么才能从周围环境中摄取能量提供给这些器件呢? 也许我们不仅要能制造出器件, 还要提供能量给器件。长远来看, 仅有纳米器件并不够, 我们需要的是自驱动

的纳米技术(self-powered nanotechnology)^[8], 这才是我的蓝图也是我首先提出来的。

编辑: 好, 这是您的蓝图, 那么怎样实现它呢?

王中林: 纳米技术的优点在于什么? 体积小, 低功耗。什么样的能源我们可以利用? 太阳能。但转换太阳能需要太阳电池板, 而许多应用是在生物系统内部, 或是室内, 或是其他不适合利用太阳能的地方。那么机械能呢? 许多东西都可以产生机械能: 我们所说的声波就是机械能, 走路的脚步是机械能, 心脏的跳动是机械能, 肌肉的拉伸是机械能, 空气的流动是机械能, 马路上的噪声, 你吹风机的呼呼声, 拉动窗帘的声音……所有这些都是机械能。我们可以把这种能量转化成电能吗? 这就是我的想法。那么第一个问题就是: 这是可能的吗? 如果用原子力显微镜 AFM 弯曲一根纳米线, 弯曲的能量可以转换成电能吗? 我们知道氧化锌有压电效应, 那能否用 AFM 和单根氧化锌纳米线证明这一点? 2005年, 我和我的学生宋金会发现解决该难题的方法, 奠定了原理性和原创性贡献。

我们利用竖直结构的氧化锌纳米线的独特性质, 在原子力显微镜的帮助下, 研制出将机械能转化为电能的世界上最小的发电装置——纳米发电机。我们利用氧化锌纳米线容易被弯曲的特性而在纳米线内部外部分别造成压缩和拉伸。同时, 竖直生长的氧化锌是纤锌矿结构, 同时具有半导体性能和压电效应。压电效应是一由材料中的力学形变而导致的电荷极化的效应, 它是实现力电耦合和传感的重要物理过程。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。他们用导电原子力显微镜的探针针尖去弯曲单个的氧化锌纳米线, 输入机械能。同时由于氧化锌的半导体特性, 我们把这一特性和氧化锌纳米线的压电特性耦合起来, 用半导体和金属的肖特基势垒将电能暂时储存在纳米线内, 然后用导电的原子力显微镜探针接通这一电源, 并向外界输电, 从而完美的实现了纳米尺度的发电功能。该文发表在 *Science* 周刊上 (*Science*, 2006, 312: 242—246)。

编辑: 纳米发电机的原理是提出来了, 它能用来驱动纳米器件吗?

王中林: 我们用 AFM 推动纳米线, 在单根纳米线上得到 3 到 12 毫电子伏特的电压, 这还远不够。要实现从科学发现到实际应用的飞跃, 最重要的一步就是要摆脱对原子力显微镜的依赖, 使纳米线能够“独立”地吸收外界环境中的机械能并完成到电能

的转化与释放。将其变得实用化的下一步是制造数以百万计的纳米线来转化能量。我们想到用超声波或其他直接的方法提供机械能。一年的努力终于解决了这些问题,2007年,我们在 *Science* 周刊上发表了相关的第二篇文章(*Science*, 2007, 316: 102—105)。

为了能实现电能的储存和释放,顶部电极与纳米线的接触面被设计成了锯齿状并覆盖了一层数百纳米厚的金属铂。在顶部电极和纳米线之间还留有一个很小的间隙,使得它们能够进行一定程度上的相对震动或形变。当外界环境中的震动波(在实验中用超声波代替)传到纳米发电机上时,会导致顶部电极的上下震动以及纳米线的左右摆动或共振。当顶部电极向下移动时,其首先碰到的是位于两个锯齿之间的纳米线的顶端的一边(外表面),然后逐渐将纳米线压弯直到纳米线顶端的另一边(内表面)也接触到锯齿表面。由于弯曲的氧化锌纳米线的内、外表面分别带有负、正电势,这时氧化锌与铂电极之间由反向不导通的肖特基接触变成了正向导通的肖特基接触,因此积累的电势得到释放。而左右摆动的纳米线则为另一种放电可能。当纳米线位于两个锯齿之间并不与任一表面接触时,外界的机械震动很容易引起它的响应。摆动中的纳米线将很有可能接触到与之相邻的铂电极表面,而且每次接触均是通过纳米线带负电势的内表面从而释放弯曲产生的电能。

由超声波带动的纳米发电机的发明可以被视为纳米压电发电由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,对于实现具有完全无线,可生物植入,以及长时期甚至终生无需照管的纳米或微电子器件,纳米发电机提供了一种理想的电源系统。

编辑:您在2008年发明的纤维纳米发电机被中央电视台《新闻联播》报道^[9],被英国《物理世界》评为2008年最好进展之一,2008年中国十大科学发

现之一。英国《新科学家》期刊把纳米发电机评为可以和手机的发明具有同等重要性的影响未来10—30年后的十大重要技术之一。您可以向我们描述一下这项技术的现状么?

王中林:2007年初,我们研究小组利用这一原理,成功地运用超声波带动纳米线阵列运动,首次实现了能独立从外界吸取机械能,并转变为电能地纳米发电机模型。超声波带动的纳米发电机是对频率较高的信号。然而,在实际环境中,机械能却是以低频震动的形式大量存在的,如空气的流动,引擎的震动等等。要使纳米发电机能够广泛应用到各个方面,最重要的一个环节就是要降低纳米发电机的响应频率,使纳米线阵列在诸如几个赫兹的低频震动下也能完成机械能到电能的转变。为了实现这一目标,我们小组的王旭东博士和秦勇博士经过将近一年的研究,终于取得了突破性的进展。我们的文章发表在 *Nature* 杂志上(*Nature*, 2008, 451: 809—813)。

我们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,然后运用两根纤维模拟了将低频震动转化为电能这一过程。为了能够实现电极与氧化锌纳米线之间的肖特基接触,我们将一根纤维表面利用磁控溅射镀了一层金膜作为电极,而另一根表面是未处理过的氧化锌纳米线。当两根纤维在外力作用下发生相对运动时,类似于两个互相挫动的圆柱刷子,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之上,从而实现了机械能到电能的转换。该发明为实现柔软,可折叠的电源系统(如“发电衣”)等打下了基础。

编辑:听说你们的纤维纳米发电机不能见水?这个问题能解决吗?

王中林:尽管这类发电机取得了巨大的成功并衍生出基于不同衬底的模型,直立式发电机的进一步发展也面临一些困难急需解决。一个挑战来自于驱动电极与 ZnO 纳米线距离的精确控制,少量的误差都会造成发电机不能正常工作。另外,直立式发电机工作时自由端和驱动电极要不断的接触和磨擦,从而可能造成纳米线和电极的磨损,进而影响纳米发电机的性能和寿命。为了解决直立式纳米发电机的问题,我们想到了能否用封装的水平式 ZnO 线实现机械能到电能的转化。为此杨如森博士和秦勇博士尝试了各种设计方案并进行了大量的实验,历

经近两年的努力最终发明了封装型交流纳米发电机,并有效地克服了直立式发电机的设计缺陷。文章发表在 *Nature Nanotechnology* 上 (*Nature Nanotechnology*, 2009, 4: 34—39)。

在这一新型交流纳米发电机中,ZnO 线水平放置于弹性高分子衬底上,其两端分别连接输出电极并固定在衬底上。由于衬底厚度比 ZnO 线的直径大的多,当弹性衬底变形弯曲后 ZnO 线整体被拉伸或整体被压缩。在压电效应的作用下,压电电场沿着 ZnO 线轴向建立并在两端形成电势差。由于在一端有肖特基势垒的存在,此压电电势差随着 ZnO 线的来回弯曲从而驱动了电子在外电路中的往复流动,因此对外接器件产生了交变电能。当交流纳米发电机工作时,ZnO 线起到的“电容”和“电荷泵”的作用,不断的将机械能转换为电能,从而实现从环境中获取能量并有效输出。单根 ZnO 线所给出的最多电压可以达到 50 毫伏。如果不考虑基片的能量损耗,就 ZnO 线而言,发电的效率可达 7%。

与直立式纳米发电机相比,交流纳米发电机在许多方面取得了重大的突破。在交流纳米发电机中 ZnO 线被固定在衬底上,避免了电极与 ZnO 线的摩擦。从而提高了发电机的稳定性和寿命。更重要的是,电极与 ZnO 线间隙大小的苛刻要求在此新型发电机不复存在,这就降低了发电机的制造工艺难度和成本。与纤维发电机相比,交流纳米发电机还克服了不可见水的弊病。如果把大量的 ZnO 线集成的同一个衬底上,其输出功率可进一步大幅提高。交流纳米发电机还可以容易地被封装在弹性材料中,这就大大地扩展了它的工作环境和应用范围。基于这种设想,利用国旗在微风吹动下的来回摆动来实现发电就不是一种梦想了。

编辑:你两年以前就说过“只有能动,就能发电”,这个目标实现了吗?

王中林:我们利用交流纳米发电机的原理,实现了利用生物活体带动的发电机。我们最近演示了如何利用微小的手指敲击^[10]和大幅度的肢体运动等活体肌肉活动来产生电能这一过程。这种纳米发电机由平放在弹性高分子薄膜衬底上的氧化锌纳米线和两端的电极构成。将封装的交流纳米发电机固定在人的手指和仓鼠的背部。手指的轻微弯曲会弯曲弹性高分子薄膜,使之弯曲变形,从而拉伸或弯曲氧化锌纳米线,产生电能。剧烈跑动下的仓鼠背部也可以拉伸或弯曲氧化锌纳米线^[11],从而实现机械能到电能的转变。将一个或几个交流纳米发电机固定

在一个弹性马夹上,然后给仓鼠穿上这个马夹,仓鼠的跑动带动马夹的拉动,马夹的拉动又会拉伸氧化锌纳米线,进而将这种跑动能转化为电能。实验结果表明,在仓鼠跑动下工作的纳米发电机可以产生高达两百毫伏的电压。

人们的周围环境中存在各种不同运动强度、不同运动频率的运动形式,一般的压电材料只能收集具有某些特定频率且强度较高的机械运动能量,传统的发电机要求机械运动的强度必须大到足以带动转子的转动,所以只能用来收集比如人的腿部运动等高强度的机械运动。我们一系列的研究成果表明以氧化锌纳米线为基础的纳米发电机可以用来有效地收集从低频到高频、从轻微运动到剧烈运动等各种不同形式的机械能,并且将其转化为电能。该研究开辟了利用人体运动进行活体体内发电的技术路线。我们还可以将其集成进生物系统,用肌肉运动发电,用血流发电,还可以用声波,噪声,微风等发电。

编辑:要想将此技术转为应用,成为一项实用技术,还需要做哪些工作?

王中林:我们现在必须做的是提高纳米发电机的发电电压。如果我们可以达到零点几伏电压,比如说 0.5 伏,它就会非常有用。我们也想将其集成为三维纳米发电机:一层还不够,十层二十层怎么样?那样我们就可以提高电流电压 (*Nano Letters*, 2008, 8: 4027—4032)。这是我们近期的目标,任务很艰巨,且具挑战性。

编辑:现在离 0.5 伏输出还差多远?

王中林:我们从 10 毫伏,也就是千分之一伏特做起,到现在增加了一百倍,到 0.1 伏。我们的目标是 0.5 伏。如果我们可以达到这一步,就可以将其用于生物探测器,比如说癌症探测器,血糖探测器等其他生物探测器。

编辑:您多次提到了氧化物的压电特性,您的“压电电子学”是什么时候首先提出来的?什么是压电电子学?

王中林:这是我开辟的一个新领域。纳米压电电子学(nano-piezotronics)这个概念是 2006 年 11 月 24 日在从台北飞回亚特兰大的飞机上想到的。在我们的工作中,用 AFM 弯曲纳米线,线的一半被拉伸,即受张力,该受力表面产生正的压电电势,线的另一半被压缩,形成负的压电电势,从而线的截面有一个电势降,可以作为栅电压来调制晶体管的电流。据此可以制作压电场效应晶体管,压电二极管。我们不用经典的半导体 p-n 结形成二极管,代之以

压电结形成二极管。这些器件利用压强或压力触发晶体管或二极管。你就有了一个对机械力形变对应变很敏感的晶体管或二极管。这是一个新的电子元件。我的博士后周军博士最近在这方面做了很漂亮的工作。

编辑:压电电子学在未来技术中有什么应用?

王中林:传统上压电效应和半导体性质是两个不同领域,半导体器件和压电器件是两个不同的东西。我现在将它们合并在一个器件中,利用压电效应和半导体性质的耦合来实现新的电子元件或器件,而这种器件的功能是受外力触发的或控制的。我们现在可以制作这些器件来测量应变——肌肉中的应变,建筑物中的应变,组织结构中的应变。我们已经发明了压电三极管,压电二极管,压电共振器和压电化学传感器等,这些基本单元的集成和硅基电子技术的结合将展现崭新的应用。

编辑:在未来的五年中,您希望看到您的研究中出现怎样的实际应用?

王中林:五年内我希望能够提供可以摄取能量驱动微小器件的纳米发电机——这种小型单元可以自己运转,从周围环境中收获能量,自我驱动,远程,无线操纵,抗干扰。你可以将其用在你想要的各种应用上。这应该是可能的。我也希望,在未来五年,提供一种小型生物探测器,可以从肌肉运动中采集

能量驱动自己。五年中,我应该可以提供基于压电电子学的小型转换器,探测器,可用于测量压强和力。从长远来看,我希望压电电子学能真正成为一门独立的学科,我希望纳米发电机可以广泛的为大众和大众应用服务。

在这里,我希望通过《中国科学基金》期刊对国家自然科学基金委员会和国内有关科研院校对我们研究工作的关注表示衷心地感谢!

参 考 文 献

- [1] <http://physicsworld.com/cws/article/news/37182>.
- [2] http://www.newscientist.com/article/mg20126921_800-ten-scifi-devices-that-could-soon-be-in-your-hands.html?full=true.
- [3] <http://sciencewatch.com/inter/aut/2008/08-dec/08decZLWang/>.
- [4] Wang Z L. Nano-piezotronics. *Adv. Mater.*, 19, 889 (2007).
- [5] Wang Z L. Towards self-powered nanosystems; from nanogenerators to nanopiezotronics (feature article). *Advanced Functional Materials*, 2008, 18; 3553.
- [6] http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?ch=specialsections&sc=tr10&id=22118.
- [7] <http://www.nanoscience.gatech.edu/zwang/>.
- [8] Wang Z L. Self-powering nanotech. *Scientific American*, (2008) 298 (No. 1) 82—87.
- [9] <http://www.youtube.com/watch?v=htQHZoOoCvg>.
- [10] <http://www.youtube.com/watch?v=uM2NTp9g-3w>.
- [11] <http://www.youtube.com/watch?v=11C9S5xEoTE>.

FROM INVENTING NANOGENERATORS TO FOUNDING NANOPIEZOTRONICS

—an Interview to Prof. Zhong-Lin Wang, Georgia Institute of Technology

Editorial Office

Abstract This interview is about the motivation, original thoughts and processes of inventing and developing the nanogenerator for building self-powered nanodevices and nanosystems. It also covers the founding of nanopiezotronics for fabricating novel and unique electronic components utilizing piezoelectric-semiconductor couple properties.

· 资料 · 信息 ·

DFG 东京代表处正式启用

德国科学基金会 (DFG) 主席柯睿礼 (Matthias Kleiner) 教授于 2009 年 4 月 15 日主持了 DFG 东京代表处的揭幕仪式。这是继北京、华盛顿/纽约、莫斯科和新德里之后, DFG 在国外设立的第五个代表处。

DFG 希望在未来能够巩固、加强与日本的科学合作。东京代表处将协助德国科学家拓展与日本同

行的合作交流,同时也为日本科学家与德国同行的合作提供便利。代表处的职责还包括分析、评估日本科学政策的相关变化,以适当方式提供给德国科学界参考。

(范英杰 鲁荣凯 韩建国 供稿)