

压电式纳米发电机的原理和潜在应用

王 中 林[†]

(佐治亚理工学院材料和工程系 亚特兰大 佐治亚州 30332 - 0245 美国)

(北京大学工学院先进材料与纳米技术系 北京 100871)

(国家纳米科学中心 北京 100080)

摘 要 纤锌矿结构氧化锌纳米线具有半导体性能和压电效应. 用导电的原子力显微镜探针针尖去弯曲竖直生长的氧化锌纳米线, 在纳米线的内部和外部分别造成压缩和拉伸, 这种独特结构导致了弯曲纳米线的内外表面产生反极性的极化电荷, 借助半导体性质的氧化锌纳米线及其金属尖部的肖特基势垒将电能暂时储存在氧化锌纳米线内, 并可用导电的原子力显微镜探针接通这一电源, 向外界输电, 从而完美地实现了在纳米尺度上把机械能转化为电能. 该纳米发电机的发电效率可以达到 17%—30%. 此项重要的科学发现将为自发电式纳米器件奠定物理基础. 文章介绍了它的工作原理和潜在应用.

关键词 ZnO 纳米线, 压电效应, 纳米发电机, 自发电

Piezoelectric nanogenerators——their principle and potential applications

WANG Zhong-Lin[†]

(*Materials Science and Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332 - 0245, USA*)

(*Department of Advanced Materials and Nanotechnology, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China*)

(*National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100080, China*)

Abstract We have converted nanoscale mechanical energy into electrical energy by means of piezoelectric zinc oxide nanowire arrays. The aligned nanowires are deflected with a conductive atomic force microscope tip in contact mode. The coupling of piezoelectric and semiconducting properties in zinc oxide creates a strain field and charge separation across the nanowire as a result of its bending. The rectifying nature of the Schottky barrier formed between the metal tip and the nanowire leads to electrical current generation. The efficiency of this piezoelectric power generator is estimated to be 17% to 30%. This approach has the potential of converting mechanical, vibrational, and/or hydraulic energy into electricity for powering nanodevices. The basic principles and potential applications are reviewed.

Keywords ZnO nanowire, piezoelectricity, nanogenerator, self-powered

1 引言

纳米技术作为 21 世纪的一个重要新兴科技领域, 在理论与实践上正经历着高速的发展. 大量新型纳米材料与器件不断被开发出来, 并在生物医学、国防以及人们日常生活的各个领域展现出前所未有的应用前景. 然而, 纳米技术发展至今, 大量的研

究都集中于开发高灵敏度、高性能的纳米器件, 几乎还没有任何关于纳米尺度的电源系统研究. 但是, 应用于生物及国防等方面的纳米传感器对这种电源系统的需求却与日俱增. 例如, 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. 然而, 任何生物体内置的无线传

2006 - 07 - 22 收到

[†] Email: zhong.wang@mse.gatech.edu

感器都需要电源,一般来说,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,从而实现器件和电源的同时小型化,这是科学家们一直所梦寐以求的.因此,开发出能将运动、振动、流体等自然存在的机械能转化为电能从而实现无需外接电源的纳米器件的新型纳米技术具有极其重要的意义.这一技术在大大减小电源尺寸的同时提高能量密度与效率,在集成纳米系统的微型化方面将产生深远的影响.

最近,我们利用竖直结构的氧化锌纳米线的独特性质,成功地在纳米尺度下将机械能转化成电能,在世界上首次研制成功纳米发电机.这一重大发现开启了纳米科学和技术的新篇章,2006年4月13日出版的美国 Science 周刊对此进行了长篇的报道^[1,2].这种纳米发电机是在具有竖直结构的氧化锌纳米线的基础上研制而成的.我们通过用导电的原子力显微镜探针将竖直的氧化锌纳米线弯曲,输入机械能.同时,氧化锌纳米线的压电效应使电荷产生极化,将机械能转化成为电能.由于氧化锌的半导体特性,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,从而完美地实现了纳米尺度的发电功能.更重要的是这一纳米发电机能达到17%—30%的发电效率,为自发电的纳米器件奠定了原理和理论基础.

2 压电纳米发电机原理探索和发现

在已知的一维纳米材料中,ZnO有三个主要的优点:首先,它既是半导体又有压电效应,这是做电动机械耦合传感器和变频器的基础;其次,ZnO的生物安全性和生物相容性相对要高^[3],能够应用在医学方面;最后,在目前已知的纳米结构中,ZnO的种类最多,如纳米线^[4]、纳米带^[5]、纳米条^[6]、纳米环^[7]、纳米弓形结构^[8]、纳米螺旋结构^[9]等.尽管大量的研究已经证明纳米线及纳米器件、纳米带有很多应用,但目前很少有人研究这些纳米体系对能量的需求.

氧化锌纳米线之所以能完成机械能到电能的高效转变,与其同时具有半导体以及压电特性密切相关.常规的压电材料,如PZT等,通常为绝缘体.尽管将它们弯曲或压缩也能产生电势变化,但由于它们无法与金属形成具有单向导电性质的肖特基势

垒,因而无法实现电荷积累到释放这一转变过程.因此,虽然目前有部分研究利用常规压电材料作电源,但都需要一个复杂的外接电路来实现电荷的积累,很难达到器件真正的微型化.

更重要的是,常规压电材料由于化学成分及晶体结构较复杂,很难合成出高质量的具有纳米尺度的结构.因此,高的输出功率只能通过增加尺寸和外界作用力来实现,无法实现小尺寸与大功率的有机结合.相反,氧化锌作为一种新型半导体压电材料,具有比较简单的化学成分与晶体结构.我们实验室通过几年的研究,已经大量合成出一系列不同形貌的氧化锌纳米结构,并能较好地控制其纯度、尺寸、形貌以及晶体结构.这为大功率的纳米发电机的开发提供了重要的物质基础.纳米线的直径很小,通常不到100nm,但其长度却可以达到数微米.极大的纵横比使得很小的作用力便能将氧化锌纳米线弯曲而产生电势差.因此,只要能实现大量竖直纳米线在较小作用力下连续进行弯曲—伸直这一过程,具有较大输出功率的纳米发电机就有可能得以实现.

我们的研究所用的ZnO纳米线阵列是以c平面方向上的 α -Al₂O₃为基底,以金粒子为催化剂,通过气相—液相—固相(VLS)的机理生长^[10,11].ZnO和 α -Al₂O₃之间的晶体取向关系允许生成一层薄而连续的ZnO/ α -Al₂O₃基底作为一个连接纳米线的金属导电电极用于测量电流值(图1(a)).纳米线沿[0001]方向生长,侧面方向为{01 $\bar{1}$ 1}(图1(b)).在纳米线尖部的大部分金颗粒要么在生长的过程中蒸发掉,要么在扫描过程中被AFM针尖扫落掉,使大部分纳米线生长前端没有金颗粒或者只有一个仅能覆盖部分顶端的半球状金颗粒(图1(b)的内插入部分).为了便于测量,我们制备了相对密度较小、长度较短(0.2—0.5 μ m)的纳米线阵列,这样AFM就能够接触单根纳米线了.

用镀金属钨(Pt)的硅针尖通过AFM进行测量,锥形角是70°.矩形悬臂的力常数经校准为0.76 N/m(图1(c)).在AFM的接触模式中,保持针尖和样品表面为5nN的力不变.针尖沿ZnO纳米线的顶端扫描,针尖的高度通过纳米线的表面形貌和接触的作用力来调整,室温下纳米线的热振动可以被忽略.为了使纳米线底部导电,用银胶镀层将基底表面的(大的)ZnO薄膜与测量电路相连接.当针尖扫过纳米线时,通过一个外部负载 $R_L = 500\text{M}\Omega$ 的电阻,可以检测到连续的输出电压信号(注意电压信号的具

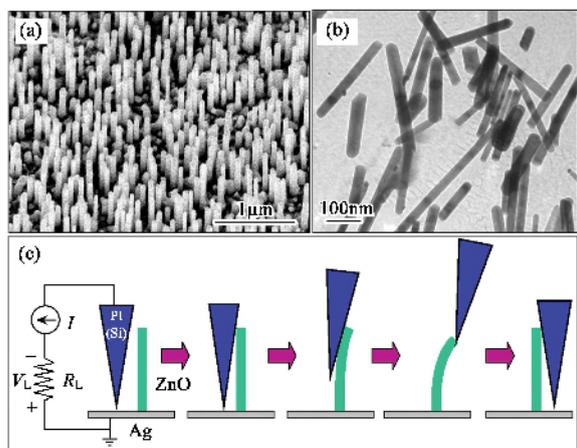


图1 纳米尺度内用垂直的 ZnO 纳米线将机械能转化为电能的实验设计图^[1]. (a) $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上的 ZnO 纳米线阵列的 SEM 图像. (b) ZnO 纳米线的 TEM 图像, 表示没有金颗粒存在的纳米线和顶端有一个很小的金颗粒存在纳米线的典型结构. 每一根纳米线都是一个单晶, 且形状均一. 中间的插入部分: 从一根纳米线中得到的电子衍射图样. 大部分纳米线的顶端没有金粒子. 右边的插入部分: 有一个金颗粒的纳米线的图像. (c) 通过一个导电 AFM 针尖使一根压电纳米线弯曲产生电流的实验装置以及实验过程. 纳米线的底部接地, 外加一个负载 R_L . R_L 的电阻值比纳米线的电阻 R_1 大得多. AFM 以接触模式沿纳米线阵列扫描

体极性). 实验中任何阶段都没有用到外部电压.

实验中, 当 AFM 针尖沿阵列纳米线扫描时, 表面形貌(扫描仪的反馈信号) 图 2(a) 和相应的通过负载的输出电压(V_L) 的图像(图 2(b)) 同时被记录下来. 在 AFM 接触模式中, 当针尖垂直于阵列的纳米线扫描时, 纳米线被连续压弯. 压弯的距离在表面形貌图像中直接被记录下来, 最大的弯曲距离和纳米线的弹性模量以及针尖扫描过的纳米线的密度也可以直接在表面形貌图像中得到^[12].

在 V_L 图像中, 观察到许多尖锐的输出峰值(如放电峰值). 这些峰一般都是噪声基线的 4—5 倍且非常尖锐狭窄, 由于 AFM 针尖扫描速度的限制, 有时有一或两个像素代表一个电压峰值, 所以不易用彩色来标记一块区域. 通过减小扫描范围和增加扫描频率, 就能够捕获到放电峰值较完整的轮廓. 大部分电压峰值的范围在 6—9 mV 之间. 从图 2(a) 中可计算得到与针尖接触的纳米线的密度大约为 $20/\mu\text{m}^2$; 在图 2(b) 中被针尖捕获到输出电压的纳米线的平均密度约为 $8/\mu\text{m}^2$, 因此约有 40% 的纳米线对外输出电压.

电压峰值的定位直接记录了纳米线的位置. 图 2(c) 表示出了时间间隔为 1 min 时得到的单根纳米线的时间 - 输出电压线轮廓图. 由于每个数据点的

停滞时间为 2 ms, 比电压峰值的平均寿命时间 0.6 ms 要长(图 2(d)), V_L 到达最大值的峰可能就由于针尖扫描“缓慢”而丢失, 所以 V_L 只表示一个被截了的尖(图 2(c) 中的箭头记号). 尖峰可以在纳米线位置处和针尖每次扫描得到的纳米线输出电压处被连续识别. 当针尖开始挤压纳米线时, 没有观察到电压输出(图 2(d)); 当纳米线的偏转量接近最大值时检测到 V_L . 纳米线被 AFM 针尖释放后, V_L 降到 0, 表明在 AFM 扫描纳米线将要结束时能检测到压电输出.

通过增大针尖扫描频率和减小扫描范围, 我们可以进一步完善和分析放电峰值的形状. 图 2(e) 表示针尖以 $12.394 \mu\text{m/s}$ 的扫描速度扫过单根纳米线时的 V_L 线轮廓图. 半峰值电压时的总宽度预计约为 0.6 ms. 电压峰值的衰减行为可通过一个等价的回路来定量描述(图 2(e)). 纳米线可被近似地看作一个电阻 R_1 和一个电容 C (包括系统的贡献). 通过电阻 R_L 的输出电压 V_L (注意电压的极性) 的寿命为 $\tau = (R_L + R_1)C$. 在我们设计的实验中, 纳米线的电阻 R_1 与 R_L 相比可忽略. 所以纳米线和系统的等价电容为 $C \approx \tau/R_L \approx 1.2 \text{ pF}$.

在相同或相似的实验条件下, 在 ZnO 纳米线中观察到的尖锐电压输出, 在金属薄膜、阵列碳纳米管或阵列 WO_3 纳米线中都未观察到. 这些数据否定了 V_L 的响应信号来自摩擦或接触电压的可能性.

这个过程产生电能的效率可以计算如下: 在一次压电放电的过程中, 一根纳米线的输出电能为 $\Delta W_{\text{PZD}} = V_0^2 C / 2$, V_0 是放电输出的峰值电压. 为了分析计算简便, 我们将纳米线近似看作二维物体. 由 AFM 针尖挤压纳米线产生的弹性形变能量为 $W_{\text{ELD}} = 3YI_y^2 / 2L^3$, Y 是弹性模量, I 是运动惯量, L 是纳米线的长度. W_{ELD} 主要以以下三种方式消耗: (1) 纳米线释放后的机械共振(图 2(f)); (2) 每个振动周期的压电放电(ΔW_{PZD}); (3) 与环境介质的摩擦/粘性. 纳米线的机械共振持续很多周期, 但最终由于介质的粘性而衰减. 每个振动周期都产生 ΔW_{PZD} , 但在当前的实验设计中, AFM 针尖只能捕获第一个振动周期产生的能量. 考虑纳米线在第一个振动周期内消耗的能量 ΔW_{ELD} , 机械能转化为电能的效率为 $\Delta W_{\text{PZD}} / \Delta W_{\text{ELD}}$, 所以得到在一个共振周期中的效率为 17%—30%. 高转换效率可能取决于纳米线能产生的极大的形变.

产生压电放电能量的物理原理来自 ZnO 的压电性质和半导体属性的耦合. 一根垂直的直立 ZnO 纳

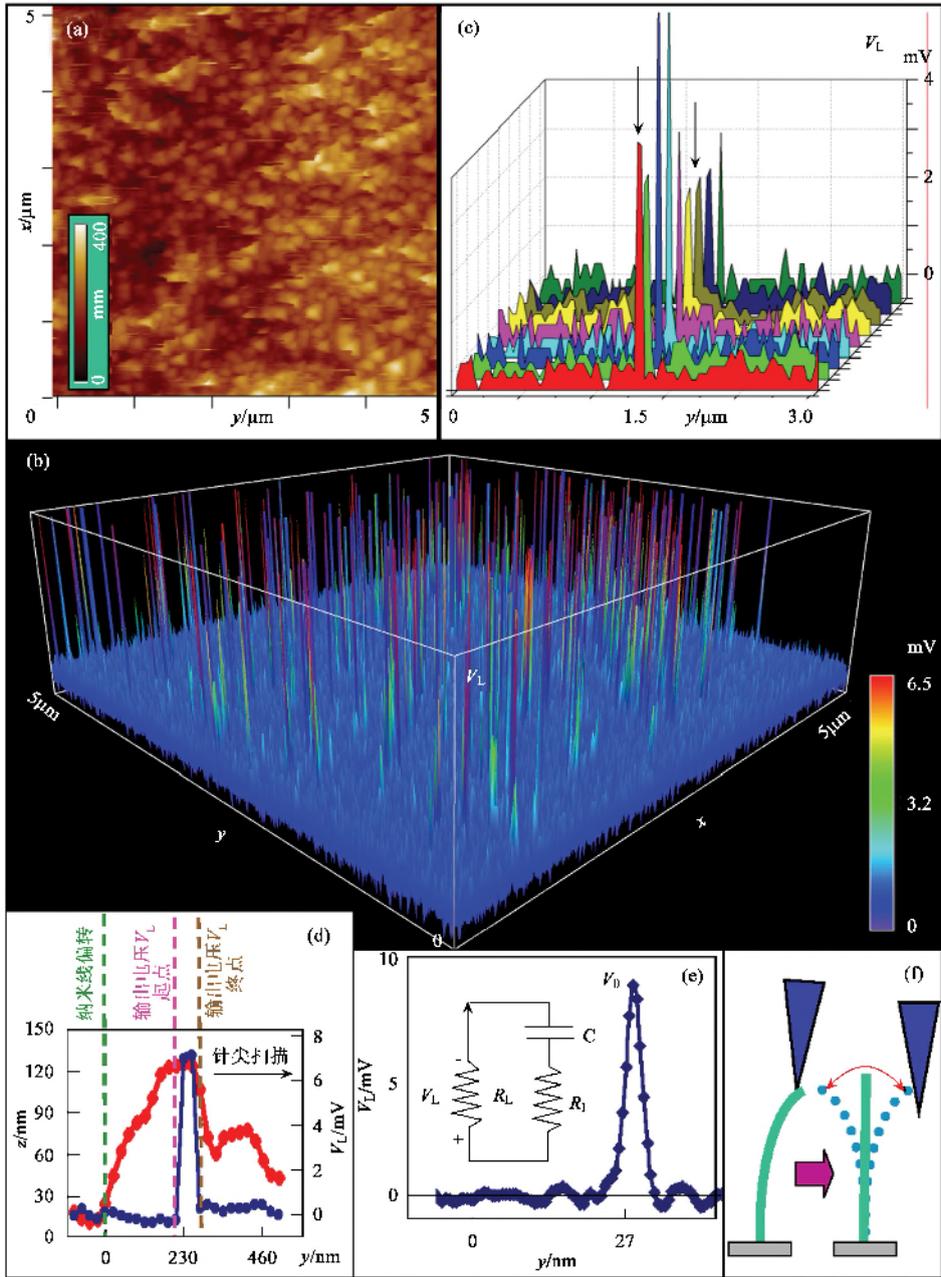


图2 在接触模式中观察到的 ZnO 纳米线阵列的电机耦合放电过程^[1] (a) 纳米线的表面形貌图像 (b) 相应的输出电压图像。(放电过程非常迅速,以致于每个放电过程只能以一对数据点为特征,所以很难用彩色显示数据) (c) AFM 针尖沿垂直的纳米线每隔 1min 扫描一次得到的一系列电压输出信号的线剖面图。数据显示了纳米线部位的电信号以及在一段时间内这种信号的可重复性。有颜色的数字代表一系列扫描所需的输出量。由 (a) 到 (c) 中,针尖的扫描速度是 $12.081 \mu\text{m/s}$,用于获得和输出每个扫描点的时间是 2ms (d) 中红色曲线为单根纳米线偏转值曲线,蓝色曲线为输出电压曲线。电压输出的峰值与纳米线最大偏转值大体对应,表明当针尖接触纳米线被压缩端时发生放电。当针尖接触纳米线,压电效应产生的电荷开始积累,此时没有发生放电现象。当纳米线偏转接近最大值 y_m 时,发生放电现象。注意横向的偏转量 y 包括针尖和接触点的几何形状贡献值,为了得到纳米线真实的偏转量,该贡献值应被减去 (e) AFM 针尖以 $12.394 \mu\text{m/s}$ 的速度沿一根垂直的纳米线扫描时得到的电压输出信号的轮廓线图。用于获得和输出每个扫描点的时间是 0.05ms ,这可通过采用 AFM 的最大扫描频率来实现。图中插入的部分是一个用于模拟放电过程测量的等价回路。(f) 被 AFM 针尖释放后纳米线的共振,表明在产生压电放电过程后存储的弹性势能大部分都转变成振动能

米线 (图 3 (a)) 被 AFM 针尖挤压产生一个应变场,外表面被拉伸(正的应力 ε),内表面被压缩(负应力 ε) (图 3 (b))。由于压电效应在纳米线内部沿 z 方向产生一个电场 E_z , $E_z = \varepsilon_z/d$, d 为沿 ZnO 纳米线方向上

的压电系数^[13],通常是正向 c 轴方向 Zn 原子层作为最上层^[14].压电场方向在外表面与在轴(纳米线方向)几乎平行,在内表面与在轴反平行(图 3(c)).在一级近似下,沿着纳米线尖端的宽度,从压缩到拉伸的侧表面的电势分布在 V_s^- 到 V_s^+ 之间.纳米线底部的电极接地.注意 V_s^- 和 V_s^+ 是由压电效应产生的电压.电势是由 Zn^{2+} 和 O^{2-} 的相对转移产生的,是纤维锌矿晶体结构中压电效应的结果,因此如果不释放应力的话,这些离子电荷不能自由移动,也不能重组(图 3(d)).只要有形变,并且没有外部自由电荷(例如金属接触点)的进入,电势差就将保持.

纳米线底部和顶端的接触是不对称的,底部的接触是 ZnO 薄膜与银层的接触,所以有效的接触是 ZnO 和 Ag 之间的接触. ZnO 的电子亲和能(E_a)是 4.5eV ^[15],Ag 的功函数(ϕ)是 4.2eV ,所以在界面处无势垒,即 ZnO-Ag 的接触是欧姆型.在纳米线的尖端,Pt 的 $\phi = 6.1\text{eV}$,Pt - ZnO 的接触是肖特基结^[16,17],并在整个传输过程中占主要地位.由于半导体 ZnO 纳米线被压缩的侧面为负压(V_s^-),被拉伸的侧面为正压(V_s^+),所以穿过肖特基结有两个截然不同的传输过程发生.

现在我们来考虑在 ZnO 纳米线顶端发生的情况.第一步,使纳米线产生形变的 AFM 传导针尖与被拉伸的表面接触,产生正压 V_s^+ (图 2(d)和(e)).Pt 金属针尖的电势几乎为 0, $V_m = 0$, $\Delta V = V_m - V_s^+ < 0$,所以金属针尖和 ZnO 表面发生负偏转.由于非合成的 ZnO 纳米线可看作 n 型半导体,所以 Pt 金属和 ZnO 半导体(M-S)表面在此可看作是一个偏压的肖特基二极管(图 3(e))和沿表面的很小的电流.第二步,当针尖压缩纳米线时(图 3(f)),金属针尖和 ZnO 表面由于 $\Delta V = V_L = V_m - V_s^- > 0$ 而产生正偏转,此时 M-S 表面是一个正偏的肖特基二极管,同时使输出电流突然升高.电流是在 ΔV 驱使下,从半导体 ZnO 纳米线到金属针尖的电子的流动产生.通过纳米线到针尖的回路中,自由电子的流动能中和分布在大量纳米线中的离子电荷,所以能降低 V_s^- 和 V_s^+ 的数量级.因此, V_L 开始减小,并在纳米线中所有离子电荷被中和的时候变为 0.这种机理解释了为什么在图 2(e)中的放电曲线几乎是对称的.根据模型,放电过程发生在纳米线被压弯直到接近最大形变量时,所以如图 2(d)在实验中观察到的那样, V_L 应该沿着针尖扫描方向参照相应的表面形貌峰有一个很小的滞后.

3 潜在应用和意义

纳米发电机的发明有可能是纳米科技发展中的重要里程碑,原因如下:第一,它首次实现了半导体和压电体双重性能的耦合,为探索该过程中的物理机制奠定了基础.第二,它的出现为从纳米器件飞跃到纳米系统提出了具体的技术路线.纳米器件的研究与开发是当今纳米技术领域的最前沿.纳米器件具有尺寸微小(纳米量级)、功耗小、灵敏度高、宏观器件所不完全具备的独特优势.然而目前为这些先进的纳米器件供电的依然是常规的宏观电源.纳米发电机的发明提出了解决纳米技术中这一极其要害问题的方案,它使得纳米器件的能量供给系统与工作系统同时都能达到纳米量级,从而保持了自备电源的完整、纳米器件系统的微小、可体内植入等特性.第三,它不仅为实现整个纳米器件工作系统的真正小型化奠定了原理基础,同时还能有效地收集生物体内甚至自然界中一直被忽略的微量运动机械能来满足纳米器件正常运转所需的能量.该能量回收过程将有重大的应用前景.第四,它的出现为氧化锌的应用开辟了新天地.目前发表的关于氧化锌纳米线、纳米棒和纳米带方面的文章数量急剧增加,然而如何开辟它们的新应用仍然是一严峻挑战.最后,氧化锌具有独特的生物可降解性和生物相容性,因此它可以被用于人体内的传感和微系统.这是氧化锌所具有的非常独特的性能.

纳米发电机在生物医学领域同样具有重要的应用价值.生物体的各种运动能产生或多或少的能量.以人为例,血液的流动产生的能量约为 0.93W ,呼吸也能产生 0.83W 的能量,人行走可以产生 67W 的能量.人体内血压的变化,血液的流动,肌肉的伸缩,肺叶的扩张等等均能带动纳米发电机上细小的纳米线来回弯曲,从而产生电能.而这些电能则可以直接供给植入人体的其他器件,如心脏起搏器或是其他原位探测传感器等.由于能量的来源是人体本身的运动,这种电源无需更换,从而可以大大减低患者的痛苦并降低医疗成本.

我们现在来估计基于纳米发电机的动力纳米装置的可能性.一次放电过程中,一根纳米线的压电能量输出约为 0.05fJ ,在电阻上的输出电压约为 8mV .由于纳米线的典型共振频率约为 10MHz ,所以单根纳米线的输出功率约为 0.5pW .如果在基底每单位面积上纳米线的密度为 $20/\mu\text{m}^2$,那输出功率的密度

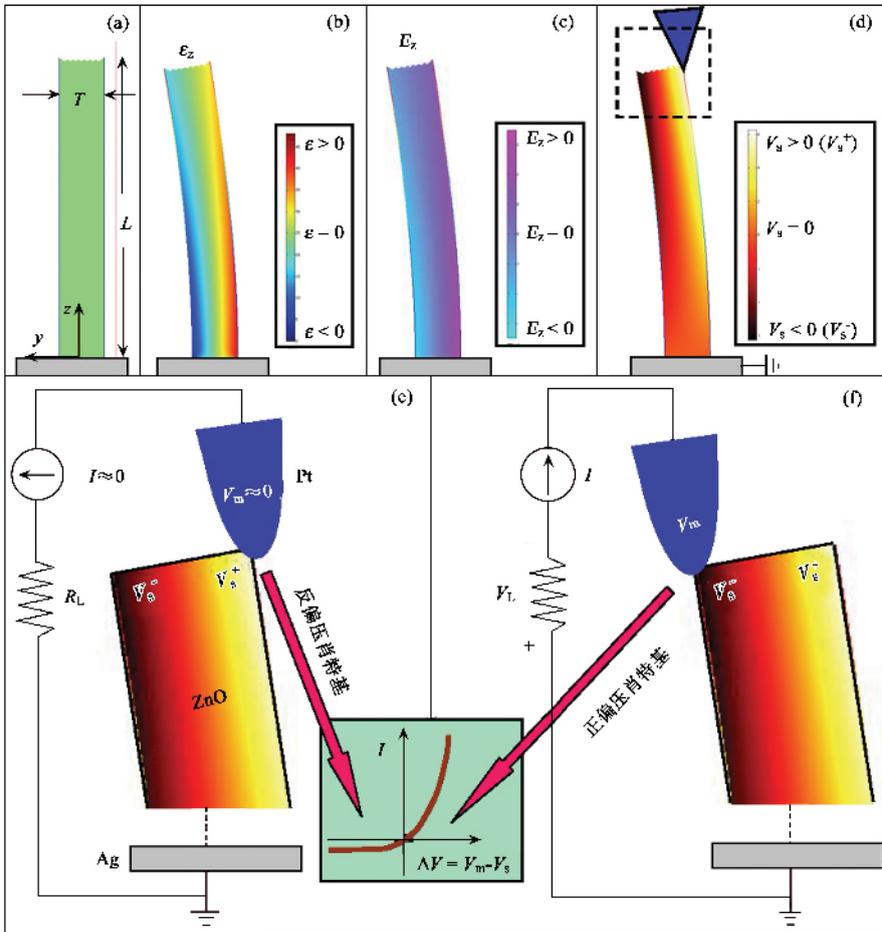


图3 传输通过压电 ZnO 纳米线的金属半导体肖特基势垒控制^[1](a)纳米线和协同系统的示意性介绍 (b)用 AFM 针尖从侧面挤压纳米线形变后纳米线内纵向的应力 ϵ_z 分布. 数据通过一根 $1\mu\text{m}$ 长、表面比率为 10 的 ZnO 纳米线的 FEMLAB 来模拟 (c)纳米线内相应的纵向压电诱导 E_z 的分布 (d)由于压电效应在纳米线中的电势分布 ((e)和 (f))AFM 针尖和半导体 ZnO 纳米线 (d)被框住的区域在两个相反接触电势 (正极和负极)间的接触,分别表明反偏和正偏肖特基修正行为 (见正文). 沿纳米线具有相对偏向的肖特基势垒能够保留住压电电荷,然后产生放电输出. 内嵌部分表示出 n 型金属半导体肖特基势垒的典型电流 - 电压关系; (e)中的过程是分离和保持电荷同时产生电势 (f)中的过程是释放电势同时产生电流

就约为 $10\text{ pW}/\mu\text{m}^2$. 通过选择一个 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 大小的纳米线阵列,所产生的功率足可以驱动基于单根纳米线/纳米带/纳米管的装置^[18-20]. 如果我们能够找到一种诱导纳米线阵列共振并输出每个振动周期内产生的压电转化得到功率的方法,就可能产生一个具有深远意义的强大的动力源,用于自组装纳米器件. 而且,如果能够通过声波、超声波或水压能来获得能量,通过在固体基底甚至可变的高聚物薄膜上生长 ZnO 纳米线阵列的方法就可以产生电能^[21]. 这种原理和得到的纳米发电机能够作为自给能纳米技术的基础,可以从环境中获得电能用于可植入的生物医用装置、无线传感器和便携式生物医学器械等^[22].

纳米发电机是一种新型的自供能量的纳米技术,它运用独特的方式,有可能从人体或外界环境中收集能量提供给纳米器件和系统. 它有可能有效地将机械运动能 (如人体的运动、肌肉的伸缩、血压的变化等) 振动能 (如声波或超声波等) 以及水压能 (如人体内体液或血液的流动、血管的收缩与舒张、甚至是自然界其他任何液体的流动) 转换成电能提供给纳米器件. 这一纳米发电机为实现自供能、无线纳米器件和纳米机器人奠定了理论与实际操作的基础. 然而,要实现纳米发电机的实际应用仍有一段很长的路程. 我们必须首先开发多根纳米线,同时开发不断输出功率的关键方法和技术. 我们要探索纳米线的疲劳和寿命问题,纳米发电机如何有效地把流

体能和声波能转换为电能. 我们要解决纳米发电机的封装问题以及它和生物体的相互作用等.

总的来说, 纳米发电机的问世为实现集成纳米器件, 实现真正意义上的纳米系统打下了技术基础. 它是开发具有自供能技术的新型同步内置生物传感器和生物医药监控、生物活体探测的基础. 同时它为实现遥控的和无线的力/压传感器和声纳探测器提供了原理型的技术. 我们期待纳米发电机未来将在生物医学、国防和日常生活中的广阔应用.

致谢 作者感谢宋金会对该工作的杰出贡献, 也非常感谢郑玉峰教授在翻译和修改本文中所做的大量工作.

参 考 文 献

[1] Wang Z L, Song J H. *Science*, 2006, 312 : 242
 [2] Song J H, Zhou J, Wang Z L. *Nano Lett.*, 2006 6 : 1656
 [3] Zhou J, Xu N S, Wang Z L. *Adv. Mater* 2006, 18 : 2432
 [4] Huang M H, Wu Y Y, Feick H *et al.* *Adv. Mater.* 2001 13 : 113
 [5] Pan Z W, Dai Z R, Wang Z L. *Science*, 2001, 291 : 1947
 [6] Kong X Y, Wang Z L. *Nano Lett.*, 2003, 3 : 1625
 [7] Kong X Y, Ding Y, Yang R *et al.* *Science*, 2004, 303 : 1348
 [8] Hughes W L, Wang Z L. *J. Am. Chem. Soc.*, 2004, 126 : 6703
 [9] Gao P X, Ding Y, Mai W J *et al.* *Science*, 2005 309 : 1700
 [10] Wang X D, Summers C J, Wang Z L. *Nano Lett.*, 2004, 3 : 423
 [11] Wang X D, Song J H, Li P *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, 127 : 7920
 [12] Song J H, Wang X D, Riedo E *et al.* *Nano Lett.*, 2005 5 : 1954
 [13] Zhao M H, Wang Z L, Mao S X. *Nano Lett.*, 2004, 4 : 587
 [14] Wang Z L, Kong X Y, Zuo J M. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 91 : 185502
 [15] Hasegawa S, Nishida S, Yamashita T. *J. Ceramic Proc. Res.*, 2005, 6 : 245
 [16] Pierret R F. *Semiconductor Device Fundamentals* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1996), 14
 [17] Park W I, Yi G C, Kim J W *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2003 82 : 4358
 [18] Huang Y, Duan X F, Cui Y *et al.* *Science*, 2001 294 : 1313
 [19] Bachtold A, Hadley P, Nakanishi T. *Science*, 2001, 294 : 1317
 [20] Chen J, Perebeinos V, Freitag M *et al.* *Science*, 2005, 310 : 1171
 [21] Gao P X, Song J H, Liu J, Wang Z L. *Adv. Mater.*, in press
 [22] U. S. patent pending



作者简介 王中林博士, 美国佐治亚理工学院(Georgia Institute of Technology)终身教授, 佐治亚理工学院校董事讲席教授(Regents Professor), 佐治亚理工学院工学院杰出讲席教授(College of Engineering Distinguished Professor), 佐治亚理工学院纳米结构表征

和器件制造中心主任, 中美联合的北京大学工学院先进材料和纳米技术系主任, 中国国家纳米科学中心海外主任, 中国首批国家自然科学基金海外优秀青年科学家, 中国科学院海外杰出学者基金获得者, 教育部长江讲座教授, 美国物理学会会士(Fellow). 曾荣获美国显微镜学会 1999 年巴顿奖章, 佐治亚理工学院 2000 和 2005 年杰出研究奖, 2005 年 Sigma Xi 学会持续研究奖, 2001 年 S. T. Li 奖金. 在国际一流刊物上发表了 440 篇(peer reviewed)论文(其中 9 篇发表在美国 *Science* 和英国 *Nature*) 55 篇综述和书章节文章, 140 篇会议论文, 10 项专利, 4 本专著和 15 本编辑书籍. 他已被邀请做过 400 多次学术讲演和大会特邀报告. 王中林教授因其对“纳米技术领域的材料科学以及基础发展做出的杰出及持续的贡献”, 法国居里夫人大学和法国联合大学(L'Institut Universitaire de France (IUF))曾两次于 2003 年 5 月 7 日和 2005 年 10 月 12 日, 以王教授个人的名义举行了专题纳米科技研讨会(a symposium in the honor of Prof. Wang). 王教授是从 1992—2002 十年中纳米科技论文引用次数世界个人排名前 25 位作者之一. 他的学术论文至今已被引用 12000 次以上. 他的论文被引用的 H 因子(H factor)是 54(在过去二十年中, 诺贝尔物理奖得主的平均 H 因子是 41). *Institute of Scientific Information (ISI)* 2003 年发表的世界纳米科技论进展总评中作为两个重点报道之一报道了王教授纳米带的研究进展. 2004 年 *Science* 周刊(2004, 304 : 1282)把王教授作为在美国任教的外国人成功的典型进行了专访和报道. 更多信息参见其个人网页: <http://www.nanoscience.gatech.edu/zlwang/>