

文章编号: 1007- 2985(2010) 04- 0071- 05

# 由随机振动所驱动的纳米发电机

——从无序中提炼出有序

李德俊

(吉首大学物理科学与信息工程学院, 湖南 吉首 416000)

**摘 要:** 研究了由超声波驱动的直流纳米发电机的发电原理, 该发电机是一个无序能量收集器, 能把纳米尺度的无规则或无序的微小机械能转变成有秩序的电能, 即该纳米发电机是一个能把混乱整理成秩序、能从无序中提炼出有序的装置. 计算了随机振动噪声所引起的纳米发电机输出的直流电流大小, 在一定的条件下, 这种纳米发电机的输出电流大小可以达到 240 nA 且可以由实验来测量的.

**关键词:** 纳米发电机, 随机振动, 无序能量收集器

中图分类号: O411.1; TK01+1

文献标志码: A

在过去的几十年中, 纳米科学技术取得了许多突破性进展, 使纳米电子学、光电子学、量子电子学、材料科学、化学、生物等领域产生变化, 对人类社会的文明进步、可持续发展将产生十分深远的影响. 到目前为止, 通过科学工作者们的努力, 已经发明了大量的有广阔应用前景的纳米装置, 如纳米电机、纳米探测器、纳米传感器、半导体纳米存储器、纳米三级管、纳米二极管等, 但是这些纳米装置的运行需要给它们提供能源. 而传统的化学电池存在着不少缺点, 因此, 近年来, 研究者们正在探索为这些纳米器件提供能源的新途径. 由于纳米器件所消耗的功率极低<sup>[1-3]</sup>, 而在周围环境中存在着大量的能量, 如太阳能、风能、热能、振动能等, 因而科学家们正在研究怎样从周围环境中获得能量的新装置<sup>[4]</sup>. 近年来由国际著名纳米科学家王中林领导的研究小组, 在这方面取得了突破性进展, 2006 年, 他们借助于原子力显微镜, 成功地把纳米尺度的机械能转变成了电能<sup>[5]</sup>, 为纳米发电机的发明奠定了坚实的基础. 2007 年他们成功地设计出了由超声波驱动的纳米发电机, 输出了连续的直流电<sup>[6-7]</sup>. 最近他们又把低频的微小振动转变成了电能<sup>[8]</sup>, 表明了纳米发电机广阔的应用前景. 在这一系列的研究中, 他们利用了纳米线的压电和半导体的耦合性质, 把纳米尺度甚至更小的机械能转变成了电能, 使得这种纳米发电机能从周围环境各种频率的振动噪声吸收和收集能量, 甚至人行走时的肌肉伸缩、脚对地的压缩、呼吸、心跳或是血液流动都有可能带动这种纳米发电机产生电能, 这一发明无疑是科技领域的进步, 将对纳米科技的发展产生较深远影响.

在物理学中, 人们只有有序能量能自发地转变为无序能量, 而无序能量是不能自发地转变为有序能量的. 事实上, 就目前来讲, 整个宇宙的运动是有秩序的, 这些有序运动从何而来, 一直是科学上的一个谜. 按目前的理论, 宇宙中的有序能量终有一天会全部自发地转变为无序运动, 整个宇宙的无序度将达到极大, 运动将在质上彻底地消亡, 整个宇宙将变得完全无序, 这些无序运动的能量再也不可能自发地转变成有序能量. 王中林小组纳米发电机的成功发明, 使人们对这些问题有了一个新的认识. 人们一般认为: 存在于周围环境中的振动噪声是一些随机的或无序的、无规则的微小振动能量, 这些混乱的微小机械能, 是一些废弃的甚至是有用的无用能量, 是不可以再加以利用的, 也就是说, 在这个世界上, 只有有序能量能自发转变

\* 收稿日期: 2010- 06- 21

基金项目: 吉首大学研究生处资助项目

作者简介: 李德俊(1956-), 男, 湖南澧县人, 吉首大学物理科学与信息工程学院教授, 硕士, 主要从事凝聚态物理研究.

为无序能量,而无序能量是不能自发地转变为有序能量的,然而通过仔细分析可以发现,王中林小组发明的纳米发电机的设计,使它成为一种无序能量收集器,它能把无规则的混乱的微小机械能收集、整理成有秩序的电能,是一种能从无序中提炼出有序、能把混乱整理成秩序的装置,笔者认为这是纳米发电机在科学上的重要价值之所在。

近年来,ZnO 作为一种多功能材料备受人们的关注,特别是随着纳米科学的进步,人们发现 ZnO 纳米材料呈现出十分丰富的构型,如纳米线、纳米带、纳米弹簧、纳米环、纳米弓、纳米螺旋等,这些 ZnO 纳米材料具有十分奇特的物理性质,展现了十分广阔的实际应用前景.笔者主要研究 ZnO 纳米线的随机摆动导致的纳米发电机输出的直流电流大小,仔细分析了带有锯齿电极的 ZnO 纳米发电机的发电原理,表明这种纳米发电机能把 ZnO 纳米线的无规则的随机摆动能量收集整理成有秩序的电能.同时研究了 ZnO 纳米线的振动特性,为计算纳米发电机输出电流作准备.并计算了随机振动的振幅的概率密度函数为高斯分布的情况下,纳米发电机输出电流的大小.

## 1 无序能量收集器——从无序中提炼出有序

王中林发明的纳米发电机原理已在文献 [5-6] 中作了描述,该纳米发电机实质上是一个无序能量收集器,能把无规则的、混乱的、随机的微小机械能收集、整理成有秩序的电能.该纳米发电机的最核心部位,就是位于发电机上方的锯齿状电极,如图 1 所示.在锯齿电极与竖直排列的 ZnO 纳米线之间留有一定的小间隙,使得 ZnO 纳米线在与铂电极

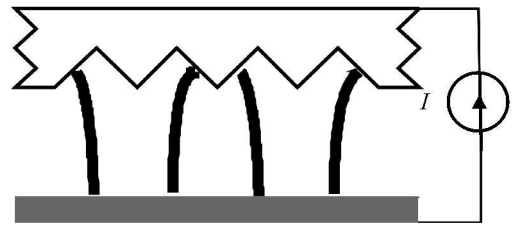


图 1 纳米线的随机摆动向外放电

接触之前能产生一定的形变,摆动中的 ZnO 纳米线每次与铂电极接触时,都是纳米线带负电的内表面与铂电极相接触,这使得 N 型半导体材料 ZnO 与铂电极形成的肖特基二极管处于正向偏置,从而把形变所产生的压电能通过外部负载释放出来.电子是怎样从带负电的内表面通过外电路到达带正电的外表面,从而与外表面的空隙复合的,在以往的文献中,似乎还没有论述清楚,根据发电机各种材料的功函数,不难得出各种材料在连接处形成了 3 个整流二极管,而不只是 1 个二极管.由于这些二极管的存在,位于被压缩的内表面上的电子能容易地通过外电路到达被伸展的外表面而与空隙复合,同时在纳米发电机中凹槽型的锯齿状电极也有一定的缺点,那就是只有那些左右摆动的 ZnO 纳米线才有可能与铂电极相接触而向外部负载放电,这就大大限制了随机摆动中的 ZnO 纳米线与铂电极相接触的几率.如果把这种凹槽型的锯齿状电极改装成圆锥型的凹坑,那么,无论 ZnO 纳米线朝哪个方向摆动,只要摆幅超过了纳米线与电极之间的间隙,就能与铂电极相接触,这就大大增加了随机摆动中的 ZnO 纳米线与铂电极接触的几率,从而会大大增加发电机的效率.

根据以上的分析,圆锥型的铂电极也能把 ZnO 纳米线的无规则随机摆动能量收集、整理成有秩序的电能.尽管在一定的环境条件影响下,ZnO 的摆动是无规则的、随机的,但无论 ZnO 纳米线向哪个方向摆动,只要摆幅超过了一定的数值,都能与圆锥状电极相接触,从而向外部负载放电.如果纳米线的数量非常多,将有许多摆幅较大的 ZnO 纳米线同时与上部电极接触,同时向外部电路放电,这就相当于由许许多多电源并联的电源组,同时向外部负载放电.由于电源并联,将大大减少等效电源的内阻,许许多多的细小电流将汇集成较大的电流,所有纳米线向外部负载放电电流的方向都是一致的,这些电流是相互叠加而增长的,这样就把随机无序的振动能量,收集放大成了有序的电能.

## 2 氧化锌纳米线的振动特性

在纳米发电机中,ZnO 纳米线都生长在氮化镓或蓝宝石基底之上,因而 ZnO 纳米线的振动问题是属于一端固定而另一端自由的杆的横振动问题,其定解问题为

$$\frac{\partial^2 \gamma(x, t)}{\partial t^2} + \frac{YI}{\rho S} \frac{\partial^4 \gamma(x, t)}{\partial x^4} = 0, \quad (1)$$

$$y(x, t) |_{x=0} = 0, y_x(x, t) |_{x=0} = 0, \quad (2)$$

$$y_{xx}(x, t) |_{x=l} = 0, y_{xxx}(x, t) |_{x=l} = 0, \quad (3)$$

其中:  $Y$  为纳米线的杨氏模量;  $I$  为惯量矩;  $S$  为纳米线的横截面积;  $\rho$  为质量密度;  $l$  为纳米线的长度. 令上述定解问题的解为

$$y(x, t) = y(x)e^{i\varphi t}, \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式, 则

$$\frac{d^4 y(x)}{dx^4} - \lambda^4 y(x) = 0, \quad (5)$$

其中  $\lambda = (\frac{\rho S}{YI} \omega^2)^{1/4}$ . (5) 式的一般解为

$$y(x) = C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x + C_3 \cosh \lambda x + C_4 \sinh \lambda x, \quad (6)$$

其中  $C_1 \sim C_4$  为待确定的常数. 根据边界条件(2)和(1)式, 可得

$$\sin^2 \varphi - \sinh^2 \varphi + (\cos \varphi + \cosh \varphi)^2 = 0, \quad (7)$$

$$y(x) = C[f(\varphi) \cos \lambda x - \sin \lambda x - f(\varphi) \cosh \lambda x \sinh \lambda x], \quad (8)$$

$$f(\varphi) = \frac{\sin \varphi + \sinh \varphi}{\cos \varphi + \cosh \varphi} \quad (9)$$

其中:  $\varphi = \lambda l$ ;  $l$  代表纳米线的长度. 由(7)式可决定纳米线的本征振动频率, (8)式决定处纳米线的振幅. 为了使问题的处理变得简单, 把纳米线的摆动等效为简谐振子, 为此, 计算纳米线摆动的最大动能, 也就是总机械能, 并把总机械能表达为纳米线顶端最大摆幅的函数. 利用(4), (8)式, 可得到纳米线摆动的总机械能为

$$w = \frac{1}{2} \omega^2 \rho S \int_0^l y^2(x) dx. \quad (10)$$

通过计算, 纳米线摆动的总机械能可写为

$$w = \frac{1}{2} m \omega^2 \frac{g_1(\varphi)}{g_2(\varphi)} A_m^2, \quad (11)$$

其中:

$$g_1(\varphi) = f^2(\varphi) \left( 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin \varphi}{2\varphi} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sinh \varphi}{2\varphi} - \frac{\sin \varphi}{\varphi} \cosh \varphi - \cos \varphi \frac{\sinh \varphi}{\varphi} \right) + \frac{\sinh 2\varphi}{2\varphi} - \frac{\sin 2\varphi}{2\varphi} + \frac{\sin \varphi}{\varphi} \cosh \varphi - \cos \varphi \frac{\sinh \varphi}{\varphi} - \frac{f(\varphi)}{\varphi} (\sin \varphi - \sinh \varphi)^2; \quad (12)$$

$$g_2(\varphi) = [f(\varphi) (\cos \varphi - \cosh \varphi) - \sin \varphi + \sinh \varphi]^2, \quad (13)$$

其中:  $m$  为纳米线的总质量;  $\omega$  为纳米线的本征振动频率;  $A_m$  为纳米线顶端的最大摆幅. 引入等效弹性常数  $k$  为

$$k = m \omega^2 \frac{g_1(\varphi)}{g_2(\varphi)} = \frac{YI}{l^3} \varphi^4 \frac{g_1(\varphi)}{g_2(\varphi)} = 15.3 \frac{YI}{l^3}. \quad (14)$$

利用等效弹性常数, 可把纳米线的摆动等效为一个弹性常数为  $k$ 、振幅为  $A_m$  的简谐振子的振动, 这样就使问题的处理变得异常简单, 纳米线摆动的总机械能可简单地写为

$$w = \frac{1}{2} k A_m^2. \quad (15)$$

根据(15)式, 要使纳米线顶端产生  $A_m$  大小的偏离, 则作用在纳米线顶端的横向偏离力为

$$F = \frac{\partial w}{\partial A_m} = k A_m, \quad (16)$$

### 3 随机振动噪声所引起的直流输出电流

由上述讨论可知王中林小组发明的纳米发电机可以把纳米尺度的随机的、无序的振动机械能收集、整理、放大成有秩序的电能, 笔者将计算由随机振动噪声所引起的纳米发电机直流输出电流的大小. 为方便计算, 假定随机振动振幅的概率密度分布函数为高斯分布函数为

$$f(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \quad (17)$$

由图 1 可知, 如果 ZnO 纳米线顶部的偏转幅度大于某一数值  $A_m$  时, 就能与上部圆锥型电极相接触, 则每根纳米线能与上部电极相接触的概率为

$$P(A_m) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\sigma} \int_{A_m}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\sigma} \int_0^{A_m} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \approx 1 - \sqrt{1 - e^{-\frac{A_m^2}{2\sigma^2}}}. \quad (18)$$

若共有  $N$  根 ZnO 纳米线, 则同时与上部电极相接触的纳米线数为  $n = NP(A_m)$ . 文献[9] 详细计算了一根弯曲的纳米线由于压电效应而产生的静电势, 根据其研究结果, 对于一根弯曲的纳米线, 被伸展的一面的电势是正的, 而被压缩的一面的电势是负的, 被压缩表面总电势的最大值为

$$\Phi_{\max} = -\frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\epsilon_0 + \epsilon} \cdot \frac{F}{Y} [e_{33} - 2(1 + \nu)e_{13} - 2\nu e_{33}] \frac{1}{a}, \quad (19)$$

其中:  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $\epsilon$  为相对介电常数;  $Y$  为弹性模量;  $F = kA_m$  为作用在纳米线顶端的侧向力;  $e_{33}, e_{13}, e_{33}$  为压电常数;  $\nu$  为 Poisson 比率;  $a$  为纳米线半径. 由此可看出在纳米发电机中, 当一根随机摆动的纳米线与上部电极相接触时, 相当于一个电动势  $E = 2|\Phi_{\max}|$  的瞬时电源.

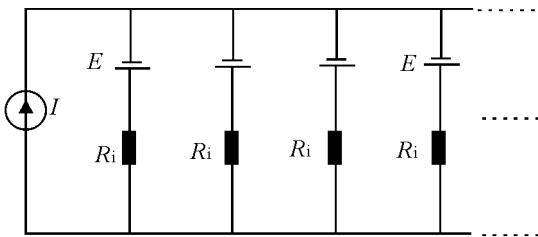


图 2 许多并联的瞬时电源同时向负载放电

下面计算由 ZnO 纳米线的随机振动所导致的纳米发电机输出的直流电流的数量级范围. 由于纳米线的数量很大, 因而将有许多纳米线同时与上部电极接触, 这就相当于许多相同的电源并联而同时向负载放电, 如图 2 所示.

这样就会大大减小电源的内阻而增大输出电流, 设有  $n$  根纳米线同时与上部电极接触, 这样等效

电源的内阻为  $R = \frac{R_i}{n}$ , 其中  $R_i$  是单根纳米线电阻. 根据文献[5] 的数据, ZnO 纳米线的电阻率  $\rho = 10^{-2} \sim 10^1 \Omega \cdot \text{cm}$ , 因此, 对于一根半径为 25 nm, 长为 600 nm 的 ZnO 纳米线, 其电阻最大也只有 30.5 M $\Omega$ . 由(18) ~ (19) 式以及文献[9-10] 所提供的数据, 取作用在纳米线顶端侧向力  $F = 5$  nN, 可算出  $|\Phi_{\max}| = 17.5$  mV, 如果纳米线总数为 1000 根, 并取  $A_m/\sigma = 1$ , 在这种情况下, 这 1000 根随机摆动的纳米线中, 同时与上部电极相接触的纳米线数  $n \approx 210$ , 利用这些数据可计算出由这 1000 根随机摆动的纳米线所引起的纳米发电机直流输出电流大小为 240.8 nA, 如果还保守一点, 把纳米线的电阻还增大 10 倍, 则输出的直流电流仍然可达 24 nA. 按目前的实验水平, 测量出这样大小的电流是毫无困难的. 按照文献[7] 的方法, 把纳米发电机串联和并联起来, 则这种集成化的纳米发电机将会向外输出更大的电流和电压.

## 4 讨论

(1) 笔者研究了纳米发电机的发电原理, 并计算了随机振动噪声所引起的纳米发电机直流输出电流的大小, 按目前的实验水平, 只要这种无序振动能量达到了纳米尺度, 就可以借助王中林小组发明的纳米发电机, 从这些无序的振动能量中提炼出有序能量.

(2) 不仅可以利用随机振动噪声来驱动纳米发电机发电, 还可利用物质的放射性衰变粒子所引起的随机振动来驱动纳米发电机发电. 比如放射  $\alpha$  粒子的物质, 自发放射出 1 个  $\alpha$  粒子的能量大约为 10 MeV, 即约为  $10^{-12}$  J 的能量, 如果  $\alpha$  粒子打在 ZnO 纳米杆上, 就会把能量传递给纳米杆而让纳米杆振动起来, 从而带动纳米发电机向外输出电能. 而按目前的实验水平来讲, 只要纳米杆的振动能量达到  $10^{-17}$  J, 纳米发电机就能向外输电; 因此, 用纳米发电机来制造核电池是一个较理想的设想. 纳米发电机纳米杆热振动的能量, 是否也能带动纳米发电机发电呢? 为此, 做一个数量级估计. 首先计算在常温下, 纳米线作热振动的能量, 根据能量均分定理, 纳米线热振动的平均能量为  $w_T = kT = 4.14 \times 10^{21}$  J, 如果纳米发电机中有大量的纳米线, 则根据统计理论不难得知, 会有不少纳米线的热摆动能量将大于平均热摆动能量, 因此在以下的计算中, 以平均能量的 10 倍作为热摆动能量的计算标准, 即以  $w = 10w_T = 4.14 \times 10^{-20}$  J 作为热振动能

量的标准. 根据文献[10]提供的数据, 对于一个半径为 25 nm, 长  $l = 600$  nm 的 ZnO 纳米线, 弹性模量  $Y = 29$  GPa,  $k = 15.3 \frac{Yl}{l^3} \approx 0.63$  N/m, 这样, 由(15), (16)式, 可计算出  $w = 10w_T = 4.14 \times 10^{-20}$  J 的热摆动能量, 相当于作用在纳米线顶端的侧向偏离力  $F = \sqrt{2kw} \approx 0.23$  nN, 这样的一根纳米线被压缩表面所产生的最大负电势  $\Phi_{max} \approx -3.6$  mV. 热摆动的能量比目前实验水平还小 3 个数量级, 但随着实验水平的提高.

### 参考文献:

- [1] JAVEY A, GUO J, WANG Q, et al. Ballistic Carbon Nanotube Field Effect Transistors [J]. Nature, 2003, 424: 654–657.
- [2] LI Y, QIAN F, XIANG J, et al. Nanowire Electronic and Optoelectronic Devices [J]. Mater. Today, 2006, 9: 18–27.
- [3] TIAN B. Coaxial Silicon Nanowires as Solar Cells and Nanoelectronic Power Sources [J]. Nature, 2007, 449: 885–890.
- [4] PARADISO J A, STARNER T. Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics [J]. Pervasive Comput, 2005 (4): 18–27.
- [5] WANG Z L, SONG J H. Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays [J]. Science, 2006, 312 (5771): 242–246.
- [6] WANG X D, SONG J H, LIU J, et al. Direct-Current Nanogenerator Driven by Ultrasonic Waves [J]. Science, 2007, 316(5821): 102–105.
- [7] WANG X D, LIU J, SONG J H, et al. Integrated Nanogenerators in Biofluid [J]. Nano Lett., 2007(7): 2475–2479.
- [8] QIN Y, WANG X D, WANG Z L. Microfibre-Nanowire Hybrid Structure for Energy Scavenging [J]. Nature, 2008, 451: 809–813.
- [9] GAO Y F, WANG Z L. Electrostatic Potential in a Bent Piezoelectric Nanowire [J]. Nano Lett., 2007, 7: 2499–2505.
- [10] SONG J H, WANG X D, RIEDO E, et al. Elastic Property of Vertically Aligned Nanowires [J]. Nano Lett., 2005(5): 1954–1958.

## Nano-generator Driven by Stochastic Vibrations

—Refining Order from Disorder

Li De-jun

(College of Physics Science and Information Engineering, Jishou University, Jishou 416000, Hunan China)

**Abstract:** The principle of the direct-current nano-generator driven by ultrasonic waves is studied. It is shown that the nanogenerator is a wonderful disorder-energy harvester, it can convert nanoscale random minor mechanical energy into electrical energy; in other words, it is a wonderful device that can convert mess into order and refine order from disorder. The direct-current value of the nano-generator caused by stochastic vibrations noise is also calculated. Under certain conditions, the direct-current value of the nanogenerator can achieve the level of 240 nA, which can be measured by experiment.

**Key words:** nano-generator; stochastic vibration; disorder-energy harvester

(责任编辑 陈炳权)