

[编者按]:“2006 第五届中国(国际)纳米科技西安研讨会”特邀了美国佐治亚理工学院董事讲席教授、世界纳米科技领域著名专家王中林博士作了精彩的学术报告。报告介绍了王教授及其所带领的团队近年来在纳米方面所做的研究,从纳米结构独特的生长过程,到纳米测量与器件,又到新近发明的“纳米发电机”以及其他工作进展。王教授演讲中随处可见的“为什么”,不仅向与会代表清楚详尽地解释了各种现象的机理,更展示了他对科学追本溯源的求索态度,使代表们不仅在学术上受益匪浅,还领略了王教授真诚、质朴的大家风范。本刊根据录音将王教授大会报告的一部分摘录整理刊登,以飨读者。

## 氧化物纳米结构的科学技术

王中林  
(佐治亚理工学院, 美国)

Science and Technology of Oxide Nanostructures

WANG Zhong-lin

(Georgia Institute of Technology, USA)

中图分类号:TB34

文献标识码:A

文章编号:1812-1918(2006)06-0005-08



我今天的报告题目是“纳米结构”。题目比较宽,但是我讲得比较窄。

我们十年来的研究主要是在纳米方面。最早我们做的是碳纳米管传输性能的测量<sup>[1][2]</sup>,后来做力学性能的测量<sup>[3]</sup>、场致发射性能的测量<sup>[4]</sup>,又做纳米秤<sup>[5]</sup>,到后来研究纳米颗粒的自组装<sup>[6]</sup>。这些是我们十年前开始做的工作。近三年来,我们的研究主要是围绕着氧化物,特别是发现一些独特的生长机制<sup>[7]</sup>,以及怎么样来理解这些不同寻常的生长过程。我们还花力气做纳米器件,更重要的是我们还在做一些纳米制造方面的工作,再加上最近的“纳米发电机”。

今天,我要讲这么几方面的内容:第一个讲纳

米结构独特的生长过程;第二个讲纳米测量和纳米器件;第三个讲一下纳米发电机;最后讲最近的一些其他工作的进展,并提出压电电子学(piezotronics)的新概念和新的研究领域。

### 一、纳米结构独特的生长过程

我的工作主要围绕着 ZnO。许多人对 ZnO 不是很熟悉。这个材料有多重要呢?《美国纳米科技 5 年总评报告》的封面用的就是 ZnO 的纳米结构,是我们组提供的。更重要的是近几年许多国际会议是关于 ZnO 的,如新加坡会议、日本会议,特别是今年美国材料学会年会约 6000 人的会议,其中有一个五天的分会,主题就是 ZnO 和有关结构,足见它的重要性。那么,它为什么重要?这就和它的性能有关系:第一,它是光电材料,是宽带半导体;第二,从性能上来说,它是半导体加压电体;从物理上来说,它是一个应用于自旋电子学的材料;从生物上来说,它是无毒性的、生物可降解的<sup>[8]</sup>;更重

要的,从纳米结构上来说,它是可塑性非常好的一个材料,可以做成各种各样的形态,而且高温下可以合成,低温下也可以合成,有极大的、可以与半导体工业结合起来的优势。基于这些特性,我们七、八年来就围绕着 ZnO 做了大量的开创性工作。

在纳米方面,目前绝大部分的研究都是纳米材料、纳米粉、纳米碳管等等,而两年以后,20%的工作将是纳米器件。器件的研发非常重要,而这个方面需要巨大的投资。我今天讲的内容一少部分是材料的生长,一多半是器件。

ZnO 结构是简单而复杂的。简单怎么说呢?它只有一个结构,就是纤锌矿结构,是中心非对称的。正因为它中心非对称,所以才具有压电效应。更重要的是,它里面有阳离子、阴离子极性面。什么是极性面?就是上下两个面带电荷(图1)。沿着c轴的方向是极化方向。如果结构单胞上边的晶体面是阳离子终结的话,下边的晶体面必然是阴离子终结的。在生长过程中,如果真空度控制得好,表面电荷会保留下来。表面电荷的保留使它有一系列不同寻常的生长现象。



图1 ZnO 纤锌矿原子结构和极性面的形成

我们合成纳米材料的方法是物理法,将粉体放在管式炉里热蒸发可以生长一系列结构。这里我讲几个具体的例子。

1、弹簧结构的形成<sup>[9]</sup>。一般来说,一个晶体生长的时候,在自由空间里面应该是长成一个直的、棒的形状。而我们做的这种材料在自由空间里可以长成螺旋状。为什么?这就和极性面有关系。极性面是怎么回事呢?我们经过显微分析发现,它的内环可能是 Zn 终结的,外环是 O 终结的,也可以反过来。这从物理角度讲是一个能量降低的过程,

就是它类似一个平板电容器,可以一面带正电,一面带负电。当这个平板电容器面积非常大的时候,它的偶极矩趋向非常大,所以能量比较大。而如果把它卷曲成一个圆筒形,它的偶极矩相互中和了,偶极矩为零,静电作用能量就降低。这是从静电能角度讲。图2是一个很简单的模型,但是解释了我们所有观察到的生长现象。从另外一个角度讲,弯曲的结构导致了弹性能量的增加。从机械和力学的角度我们知道,一个直的材料弯成有弧度时,它的能量是会增加的。静电作用能量和形变弹性能量相互竞争。当纳米带子的厚度非常小的时候,就存在一个临界值。小于这个厚度时,总能量降低;大于这个厚度,总能量增加。因此,螺旋结构的形成是纳米级才出现的现象。

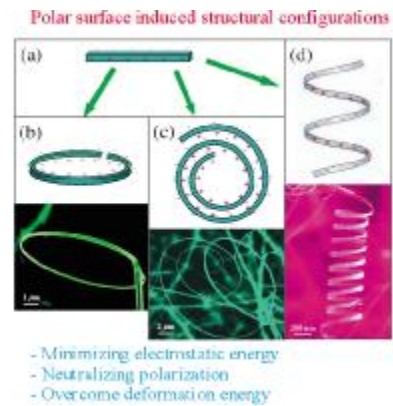


图2 极性面导致的 ZnO 纳米弹簧的形成过程

2、纳米环结构<sup>[10]</sup>。ZnO 纳米环是由气相-固相的过程生长而形成的。对于这一完美的单晶结构的环(图3),显微分析时发现环的上边棱是锌离子终结的,下边棱是氧离子终结的。它是由一个多环的纳米带子一环一环绕成的,就像线圈一样,叫自环过程。如果是线圈,它绕的时候,必然要找到线圈开始的那一端,最后终结的一端,而且绕的角度都要对上。我们仔细分析了这个自环过程,

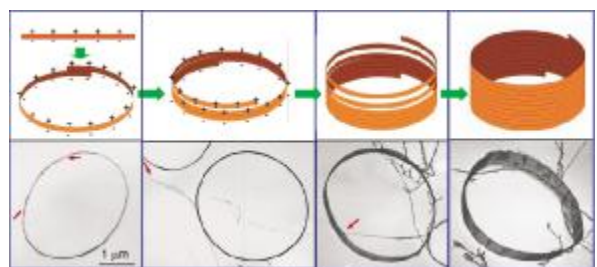


图3 极性面导致的 ZnO 纳米环的形成过程

通过纳米环的显微结构发现, 它的环绕是由极性面导致的。就像头发丝一样, 头发长得短, 就只能是小平头, 长得长就可以卷回来成卷发头。卷回来以后, 由于在重叠处界面电荷的中和而使能量降低, 就奠定了纳米带的一圈接一圈自环绕, 产生边长边绕的现象。

3、螺旋结构<sup>[11]</sup>(图4)。这个螺旋是一个刚体。一般情况下, 用气相法很少能做出这样的结构。这个结构是一个具有超晶格结构的纳米带子扭转的结果。这里讲的超晶格是同一种材料但有两种取向, 而不是我们传统上讲的超晶格。如果把它放大看, 这个纳米带子的边沿方向有很细的条纹, 条纹的宽度是 3.5 nm, 条纹的间距也是 3.5 nm。这就是超晶格。它这个超晶格是一种晶体, 两种取向。这个超晶格是怎么来的呢? 把它放大到原子级看, 它是两个很细的条子(strip), 它们之间的方向有 90° 转角。电子衍射显示它有两套结构, 一个是极性面, 一个是非极性面。这两个斑点之间有 5° 转角。5° 转角的意思就像要拿木片做成一个水筒一样, 相邻的木片要有一个转角。晶体也一样, 要形成旋的时候, 晶格要有一个转动, 5° 角的转动。为什么需要 5° 角的转动? 这是因为, 两个相邻的条子之间有 2.9% 的晶格失配, 转了 5° 以后, 失配能量降低。像木片做水筒一样, 每个有 5° 转角, 如果有 100~200 个木片, 就可以旋起来。就这样, 边生长边旋转就形成螺旋了。横跨纳米带子的宽度, 有部分面是带电的, 有部分面是不带电的。

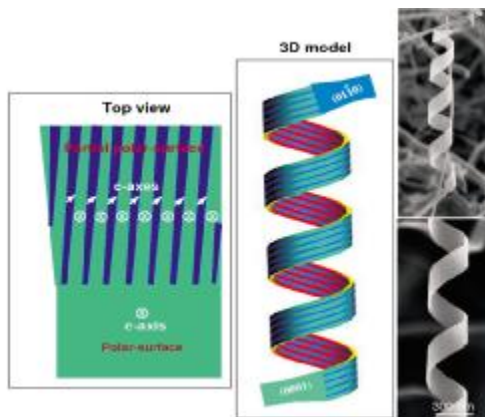


图4 极性面导致的 ZnO 纳米螺旋的形成过程

## 二、纳米测量、纳米器件

1、纳米测量。仅仅知道螺旋形成的过程还不

够, 我们还要做物性测量, 其中一个弹性系数, 就像一个弹簧, 要知道它的弹性系数有多大。只要我们用原子力探针去压它, 从弹性压缩的用力 and 位移就可以得到弹性系数。从弹性系数就可推出杨氏模量。

现在我给大家讲一下一个纳米带子可以柔软到什么程度<sup>[12]</sup>。大家知道陶瓷是硬而脆的。一个瓷盘子, 如果不是复合材料, 是纯陶瓷的话, 摔到地板上肯定碎。但是, 到纳米级的时候, 它的脆性就基本消失了, 它变得有韧性, 不易碎了。我们最近利用离子束会聚显微镜做了个实验 (图5)。在 A 点焊接, B 是一个探针, 可以把这个纳米带拉直了。要是金属弹簧, 你把它拉直, 它绝对就回不去了。我们大家都知道超塑性, 拉长的程度到了理论极限, 远远超出了你所期待的陶瓷所具有的性能, 所以在这个尺度就无所谓陶瓷和金属了。我们还做了断裂实验。什么是纳米级的断裂? 传统的断裂必须有一个形核点。如果材料的尺寸比核还小, 它是怎么断裂的? 这是一个新概念和新领域<sup>[12]</sup>。

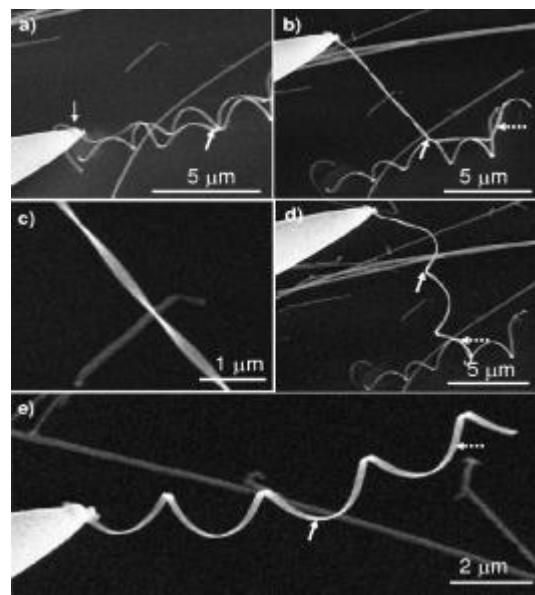


图5 ZnO 纳米螺旋的超弹性性能的测试

2、纳米器件 我现在讲纳米器件及其测量。ZnO 是一个很好的材料, 它有压电效应。我们就抓住这个微观级、纳米级的压电效应做了一系列工作<sup>[13]</sup>。压电是晶体在外力的作用下发生极化而产生电压的一个效应。每一个单胞都有极化, 总的单胞加起来就是一个宏观的极矩。压电效应是由压电系数来表征的。我们发现纳米带子的这个系数比

块状要大3倍<sup>[4]</sup>。我们用纳米带子做压电谐振器并达到了250MHz的共振频率。

氧化物对氧空位很敏感。你把它暴露在空气中的时候,氧就可以慢慢扩散进去。这个扩散系数是多少?我们把纳米带子放在硅片上,一半用 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 封起来,一半不封,把它暴露在空气中,测它的导电性,发现导电性逐渐降低。通过与理论计算的比较我们发现,纳米带子中氧空位的扩散系数比固态的要大10倍<sup>[5]</sup>。

力学性能的测量方法有几种,我不打算做综述。我们做的最早的开创性工作是用共振法来测纳米碳管的力学性能<sup>[2]</sup>。我今天讲一个不同的方法,用原子力学显微镜来测弹性模量。如果有两个电极,把纳米带子放上去,拿AFM来测。一般人的办法是找到中心点,压一下,测位移和力的关系,就把杨氏模量算出来了。我们的方法是像过桥一样,把探针从头到尾一步扫过去,然后把测的理论曲线和理论模拟进行比较,这样得到的杨氏模量将是最准的,因为这是一系列测量的统计结果,并且是唯一能确定哪个理论模型更符合实际<sup>[6]</sup>。

做纳米材料的人都知道,气相、液相和固相的生长过程——VLS,选择适当的基板,放上催化剂,在适当的气氛下就长出竖直的纳米线来了。现在,我想不为了测纳米线的力学性能而破坏这个样品。如果我有一个直立的纳米线,利用原子力显微镜扫描过去的时候,在接触模式下,将得到形貌相,同时也得到由纵向力所形成的相。从形貌相得到纳米线弯转的位移,从纵向力所形成的相得到产生弯转所需要的力,由此就可得到纳米线的弹性模量<sup>[7]</sup>。

### 三、纳米发电机

我讲的发电不是发的电够西安市来用,而是纳米器件里面用的电。首先什么是纳米发电机?为什么要发电?做这个工作的动机是什么?

1、研究动机。从环境里面捕获能量(harvesting energy from environment)是目前研究的一大前沿。在我们生活中,风能就是环境给予的能量。在身体里面,血流就是能量,肌肉伸缩就是能量,走路也是能量,可惜这些都是废能。怎么能把这部分能收获回来、利用起来?

我们做纳米技术研究的一个重大部分就是纳米器件。然而,器件只是一个部分,不是系统。形成

系统的一个很重要的部分就是电源。尽管纳米器件需要的功耗非常小,但其供电问题是急需解决的。纳米器件很小,但后面的电源极大!就如同MEMS器件做得好,但没有电源是不工作的;纳米机器人做得好,没有电也是不工作的。还有,从生物医学应用来说,能解决放置在体内的纳米器件的供电问题意义重大。电是一切!所以我觉得探讨这方面问题非常必要。

一讲到发电,我们就会想到三峡的大水轮机发电。它靠的是螺线圈切割磁力线的原理,但是,这个发电的机制在纳米级可能是行不通的。磁力线太大,纳米线又太小,怎么切割?我们就想用压电效应来发电。用一个导电型的AFM针尖去推竖直的ZnO纳米线,针尖就把机械能量从针尖转移成纳米线的弹性形变能(图6)<sup>[8]</sup>。那么,由于压电效应,纳米线就有可能产生极化电荷。用AFM针尖扫过去的时候,有60%的纳米线都可以放出电来。但是必须小心,一定要证明不是摩擦起电,不是接触电。

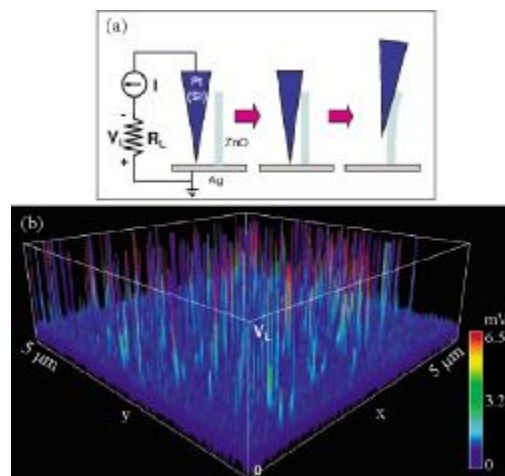


图6 (a)纳米尺度内用垂直的ZnO纳米线将机械能转化为电能的实验设计图。(b)在接触模式中观察到的ZnO纳米线阵列的电机耦合放电过程和相应的输出电压图像。

2、效率测算。用原子力显微镜针尖推纳米线的时候,总的输出机械能可以算出来;把它推过去,当这个针离开的时候,纳米线不是静止的,它还要震动很多周期,那么,消耗在每一个周期的机械能是多少?把这个必须算出来。同时在每一个周期它发的电能可以测到。这两个的比例就是效率,它是百分之十几到百分之三十。

3、发电的机理<sup>[18][19]</sup>。现在我们考察放电的过程(图 7)。纳米线是垂直的,当用原子力显微镜推它的时候,它就会有拉伸的一面和收缩的一面。拉伸的一面是正应力,是伸长;收缩的一面是负应力。压电效应是什么呢?压电效应的电场简单说是和应变成正比,应变是正,电场即为正;应变是负,电场即为负。正电场一面电场朝上,负电场一面电场朝下。就这么一个短短的 20 nm 宽的纳米线,电场就可以反转,这是压电效应。那么,电场的反转表示的是势场的反转。

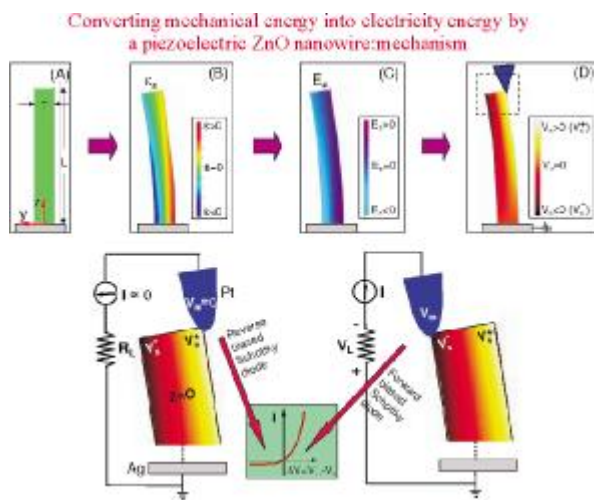


图 7 纳米发电机的发电原理图示。(A)纳米线和协同系统的示意性介绍。(B)用 AFM 针尖从侧面挤压纳米线形变后纳米线内纵向的应力  $\epsilon_z$  分布。(C)纳米线内相应的纵向压电诱导  $E_z$  的分布。(D)压电效应在纳米线中的电势分布。(底部图) AFM 针尖和半导体 ZnO 纳米线 (D)中被框住的区域在两个相反的接触电势(正极和负极)间的接触,分别表明反偏和正偏肖特基矫正行为。沿纳米线具有相对偏向的肖特基势垒能够保留住压电电荷,然后产生放电输出。内嵌部分表示出 n-型金属半导体肖特基势垒的典型电流-电压关系。左手中的过程是分离和保持电荷同时产生电势。右手中的过程是释放电势同时产生电流。

金属和半导体接触的时候有两种类型,一种是肖特基(Schottky),一种是欧姆型。什么时候出现肖特基呢?对于 n-型半导体,当金属的功函数大于半导体的亲和能的时候,属于肖特基;小于它的时候,是欧姆型。肖特基的作用就像一个二极管。当金属箔镀的电极推纳米线的时候,纳米线接触针尖的一面为正电位,金属针尖的电压比半导体纳米线小,因此在界面处形成一反相的肖特基,就像反向的二极管一样,只有电压没有电流。这个过

程是针尖传递能量,产生电荷-分离电荷-保留电荷。当这个针尖一扫过去接触到纳米线收缩的一边时,由于压电效应在这边产生负电位,金属比半导体的电位高,因此产生一正偏压的肖特基,原来积累的电荷马上放电输出。整个发电过程是一个半导体效应和压电效应有有机耦合的结果。

4、进一步的工作。我们最近做的工作还不光是在这个硬的基片上,我们把纳米线生长在具有柔韧度的高分子基片上<sup>[20]</sup>。高分子有时候是可以生物降解和生物匹配的。一折叠就可以放在肌肉里面,肌肉一动,就可以发电。人体里面很多能量,有血流的能量、呼吸的能量,走路的功率是 67 W。一个纳米器件工作的功率是纳瓦(nano-Watt)级。把这种高分子基片做在鞋底里,一走路就可以发电了。

我们最近还做了很多力电耦合的传感器。我们可以做出力的信号传感器,可以测到 1 个纳牛(nano Newton)的力<sup>[21]</sup>。同时也实现了压电式三极管<sup>[21]</sup>和压电式二极管<sup>[22]</sup>。基于这些工作,我提出了一个新的概念和领域——压电电子学(piezotronics)<sup>[23]</sup>,即基于图 7 中的纳米线的压电电位所制造出的电子器件。

#### 四、最近其他工作的进展

1、利用常见原料做出复杂的纳米结构。我先介绍山东大学刘宏教授和重庆大学胡陈果教授在 Georgia Tech 访问研究期间做的一个工作。我们共同发明了一种合成复合氧化物单晶纳米材料的新方法<sup>[24]-[26]</sup>,即复合氢氧化物溶剂法(图 8)。该方法以熔融的混合碱作为合成介质,以价格低廉的无机盐和氧化物为合成原料,在低于 200°C 的温度下

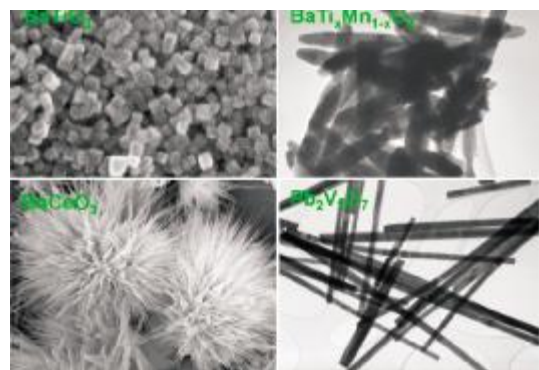


图 8 利用复合氢氧化物溶剂法合成的纳米材料

和常压下进行溶液反应,合成了多种应用于铁电、铁磁、巨磁阻、压电材料,燃料电池及半导体的复合氧化物一维和零维单晶纳米材料,为研究功能性氧化物的纳米级科学和技术开辟了一条具有重大商业应用前景的新方向。

这种方法基本原理是:将固体氢氧化钠、氢氧化钾、氢氧化锂三种中的两种或三种按照一定比例配合作为合成反应的溶剂,以降低其熔融温度。复合氧化物  $AxByOz$  的 A 位元素以无机盐的形式引入, B 位元素采用氧化物的形式引入。将反应物加入混合碱中,在大气常压下,经加热融化及保温反应后,在溶液中形成单晶纳米材料。由于不同材料的结晶习性不同,单晶纳米材料发育成纳米带或纳米立方体。在合成过程中,熔融的混合碱既起到溶剂的作用,又参与合成反应,却不最后进入产物。这种合成方法为一步合成法,并具有以下优点:因为避免了高温和高压,合成过程中控制参数较少,更容易实现工业化控制和批量生产;所采用的原料为廉价的化学原料,合成成本较低;合成过程中,纳米材料在熔液中自由发育,所得到的单晶纳米材料一般具有规则的外形;在合成过程中没有引入表面活性剂或模板剂,纳米材料的表面洁净,适合对其进行本征性能的研究,同时也容易进行表面改性。这一合成方法具有一定的普适性,适合多种复合氧化物单晶纳米材料的合成。通过更改反应物,这种方法也可以得到单一氧化物和氢氧化物单晶纳米材料。这一研究成果创立了一种全新的纳米材料的合成方法,将对纳米材料的研究和应用起到重要的推动作用。

2、单晶纳米球的形成。芯片的化学机械抛光是半导体工业中重要的一环。要在 8 到 12 英寸的芯片上达到亚纳米级的平整程度,同时还要抛得快,我们需要质量和结构非常高的抛光膏。抛光膏的选择要求是抛光速率高,平整度好,划痕少。有两种材料可以用,一个是  $SiO_2$ ,一个是  $CeO_2$ 。一般做出来的  $CeO_2$  粉都是晶态。单晶材料一般不成球形,它是由{100}面和{111}面包围起来的。晶态的  $CeO_2$  纳米颗粒有棱有角,用于抛光,划痕多。要提高抛光质量,最好是球形,像珠子一样。

最近,我们和奉向东博士等合作,利用火焰喷射高温分解法,首次合成出了直径小于 100 纳米

的球形钛掺杂  $Ce_{1-x}Ti_xO_2$  单晶纳米颗粒<sup>[7]</sup>(图9)。这是第一个合成出的具备单晶性质的球形氧化物陶瓷纳米颗粒,是工业化大规模无机合成领域的一个重大突破。在此合成工艺中,含铈(Ce)和钛(Ti)成分的乙醇溶液以雾状喷入燃烧腔内,并迅速被点燃。燃烧过程可产生两千多度的高温,使其中金属成分同时燃烧并生成金属氧化物的纳米粉尘。纳米粉尘通过燃烧区后温度迅速降低,从而得以完成化学反应,结晶并生长。这一过程中,纳米颗粒的生产速率可达到 300 克/小时。

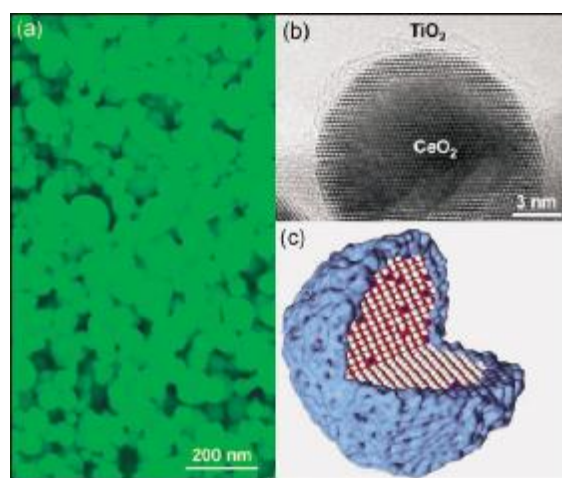


图 9:(a)球形单晶二氧化铈纳米颗粒的扫描电子显微照片。(b)球形单晶二氧化铈纳米颗粒的透射电子显微照片。最外层的非晶包裹层是二氧化钛。(c)分子动力学模拟的球形二氧化铈纳米颗粒的结构。

我们通过高分辨电子显微镜研究发现,单晶球状二氧化铈纳米颗粒的形成与钛的掺杂密切相关。没有钛掺杂的产物呈不规则的多面体结构,而加入 6%以上的钛后的产物则呈规则的球形。在纳米球的表面,附着一层 1~2 nm 厚的无定形非晶壳层。扫描透射显微镜的分析表明这一薄层为二氧化钛( $TiO_2$ )。当仅有铈参与反应时,单晶二氧化铈颗粒的生长趋向以能量最低的{111}和{100}面作外表面,因此,所得产物为棱角分明的多面体结构。而当引进钛后,结晶过程中则包括了二氧化铈和二氧化钛两相。在燃烧腔两千多度的高温下,二氧化钛由于熔点较低(约 1800℃)而呈熔融状态,包围在固态的二氧化铈核周围。在二氧化铈晶体的整个生长过程中,被液态的二氧化钛外壳包裹的整个晶粒一直保持规则的球形。生长过程的高温使部分钛进入二氧化铈的晶格之中,形成掺杂

结构( $Ce_{1-x}Ti_xO_2$ )。试验证明,掺杂钛的二氧化铈纳米球颗粒具有更好的研磨性质。以研磨表面覆盖有 1000 纳米氧化硅的硅晶片为例,纯二氧化铈的研磨速度为 195 纳米/分钟,而掺杂有 12.5% 钛的二氧化铈的研磨速度则达到了 300 纳米/分钟。同时,硅晶片表面的划痕也降低了 80%。

球状单晶氧化物纳米颗粒的发现在理论与实际应用上具有双重指导意义。球状单晶的合成打破了晶体必须由能量最低面构成的常规理论。在工业应用领域,其相对高效的生产速率使得这一工艺能直接应用于大规模工业生产。与通常使用的研磨材料相比,通过采用这种球形纳米颗粒作为研磨材料,硅片的研磨速度增加了 50%,而表面缺陷下降了 80%。这一发现为生产高质量的硅晶片提供了实现的可能,进而能大大推进下一代高精度、高密度的集成电路以及集成纳米器件的制造的发展。

## 五、致谢和结语

最后,感谢我的学生、我的博士后、访问学者和合作的伙伴,他们对这些工作做了巨大的贡献。大家有时间可以访问我们的网页([www.nanoscience.gatech.edu/zwang](http://www.nanoscience.gatech.edu/zwang))。希望利用我们所有的人员、财源、实验的条件为国内培养一些人才。人才最关键。发表两篇文章那都不是很大的事,关键是把人培养出来。人决定一切!

我国的《纳米科技》杂志,我觉得办得好,具有极大的科普意义。在国外有两种杂志叫 *Material Today* 和 *Nano Today*。国内这个杂志和国外这两个杂志是对应的。我觉得对国内外的交流和发展会起到很多作用。

我今天讲的是压电效应导致的纳米结构,讲的是  $ZnO$ ,讲的是从材料的合成生长机制,到器件的制造,到性能测试,最后到纳米发电机的发现过程等等。我觉得在纳米材料压电效应方面还有很大潜力,我们还要继续创新,希望有一天能够商业化,对社会产生效益。同时我提出了一个新的概念和领域——压电电子学(*piezotronics*)。

### 参考文献

[1] S. Frank, P. Poncharal, Z.L. Wang, W.A. De Heer. Carbon Nanotube Quantum Resistors [J]. *Science*,

1998,280:1744-1746;  
[2] Philippe Poncharal, Claire Berger, Yan Yi, ZL Wang, Walt A de Heer. Room Temperature Ballistic Conduction in Carbon Nanotubes (Feature Article) [J]. *Phys. Chem.*, 2002,106:12104-12118.  
[3] P. Poncharal, Z.L. Wang, D. Ugarte, et al. Electrostatic Deflections and Electromechanical Resonances of Carbon Nanotubes[J]. *Science*, 1999,283:1513-1516.  
[4] Ruiping Gao, Zhengwei Pan, Zhong L. Wang. Work Function at the Tips of Multi-Walled Carbon Nanotubes [J]. *Appl. Phys. Letts.*, 2001, 78:1757-1759.  
[5] Z. L. Wang. Structural Analysis of Self-Assembled Nanocrystal Superlattices [J]. *Adv. Mater.* 1998,10:13-30.  
[6] Z.L.Wang. Transmission Electron Microscopy of Shape-Controlled Nanocrystals and Their Assemblies (Invited review article)[J]. *J. Phys. Chem. B*, 2000,104 (6):1153-1175.  
[7] Zhong Lin Wang, Xiang Yang Kong, Yong Ding, et al. Semiconducting and Piezoelectric Oxide Nanostructures Induced by Polar Surfaces [J]. *Adv. Functional Mater.*, 2004,14: 944-956.  
[8] Jun Zhou, Ningsheng Xu, Zhong Lin Wang. Dissolving Behavior and Stability of ZnO Wires in Biofluids - a Study on Biodegradability and Biocompatibility of ZnO Nanostructures[J]. *Adv. Mater*, 2006,18:2432-2435.  
[9] X. Y. Kong, Z. L. Wang. Spontaneous Polarization and Helical Nanosprings of Piezoelectric Nanobelts[J]. *Nano Letters*, 2003,3:1625-1631 + cover [One of the Most Cited Paper in Materials Science in 2004 (ISI)].  
[10] X. Y. Kong, Y. Ding, R. S. Yang, Z. L. Wang. Single-crystal Nanorings Formed by Epitaxial Self-coiling of Polar-nanobelts[J]. *Science*, 2004,303:1348-1351.  
[11] Pu Xian Gao, Yong Ding, Wenjie Mai, William L. Hughes, Changshi Lao, Zhong Lin Wang. Conversion of Zinc Oxide Nanobelt into Superlattice-Structured Nanohelices[J]. *Science*, 2005,309:1700-1704.  
[12] Pu Xian Gao, Wenjie Mai, Zhong Lin Wang. Super-elasticity and Nanofracture Mechanics of ZnO Nanohelix [J]. *Nano Letters*, Published Online, 2006.  
[13] Brent A. Buchine, William L. Hughes, F. Levent Degertekin, Zhong L. Wang. Bulk Acoustic Resonator Based on Piezoelectric ZnO Belts [J]. *Nano Letters*, 2006,6:1155-1159.  
[14] Minhua Zhao, Zhong Lin Wang, Scott X.Mao. Piezoelectric Characterization on Individual Zinc Oxide

- Nanobelt Under Piezoresponse Force Microscope [J]. Nano Letters, 2004,4:587-590.
- [15] Jin Liu, Puxian Gao, Wenjie Mai, Rao Tummala, and Zhong L. Wang. Quantifying Oxygen Diffusion in ZnO Nanobelt Nanodevices [J]. Appl. Phys. Letts., 2006,89: 063125.
- [16] Wenjie Mai, Zhong Lin Wang. Quantifying the Elastic Deformation Behavior of Bridged-Nanobelts [J]. Appl. Physics Letters, 2006,89:073112.
- [17] Jinhui Song, Xudong Wang, Elisa Riedo, Zhong L. Wang. Elastic Property of Vertically Aligned Nanowires [J]. Nano Letters, 2005,5:1954-1958.
- [18] Zhong Lin Wang, Jinhui Song. Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays [J]. Science, 2006,312:242-246.
- [19] Jinhui Song, Jun Zhou, Zhong Lin Wang. Piezoelectric and Semiconducting Dual-property Coupled Power Generating Process of a Single ZnO Belt/wire—a Technology for Harvesting Electricity from the Environment [J]. Nano Letters, 2006,6: 1656-1662.
- [20] Pu Xian Gao, Jinhui Song, Jin Liu, Zhong Lin Wang. Nanowire Nanogenerators on Plastic Substrates as Flexible Power Source [J]. Adv. Materials, 2006.
- [21] Xudong Wang, Jun Zhou, Jinhui Song, Jin Liu, Ning-sheng Xu, Zhong L. Wang. Piezoelectric-Field Effect Transistor and Nano-Force-Sensor Based on a Single ZnO Nanowire [J]. Nano Letters, 2006.
- [22] Jr H. He, Cheng H. Hsin, Lih J. Chen, Zhong L. Wang. Piezoelectric Gated Diode of a Single ZnO Nanowire. Adv. Mater., 2006.
- [23] 王中林. 压电式纳米发电机的原理和谐在应用, 《物理》36(11)(2006),897-903.
- [24] Hong Liu, Chenguo Hu, Zhong Lin Wang. Composite-hydroxide-mediated Approach for Synthesizing Nanostructures of Complex Oxides [J]. Nano Letters, 2006,6: 1535-1540.
- [25] Chenguo Hu, Hong Liu, Wenting Dong, Yiyi Zhang, Gang Bao, Changshi Liao, Zhong Lin Wang. La(OH)<sub>3</sub> and La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanobelts—synthesis and Physical Properties. Adv. Mater., 2006.
- [26] C. G. Hu, H. Liu, C. S. Lao, L. Y. Zhang, D. Davidovic, Z. L. Wang. Size-manipulable Synthesis of Single-crystalline BaMnO<sub>3</sub> and BaTi<sub>1/2</sub>Mn<sub>1/2</sub>O<sub>3</sub> Nanorods/nanowires [J]. J. Phys. Chem. B, 2006, 110:14050 - 14054.
- [27] Xiangdong Feng, Dean C. Sayle, Zhong Lin Wang, et al. Converting Ceria Polyhedral Nanoparticles into Single-

Crystal Nanospheres [J]. Science, 2006,312:1504-1508.

## 人物介绍

王中林, 教授, 物理学博士, 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), 美国科学发展协会会士 (fellow of AAAS)。王教授荣获了美国显微镜学会 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 (美化学学会), 美国自然科学基金会 CAREER 基金。王教授已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《科学》和英国《自然》), 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 年五月七日和 2005 年 10 月 12 日, 以王教授个人的名誉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 到 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。他的学术论文已被引用一万四千次以上。他的论文被引用的 H 因子是 56。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《科学》(Science 304 (2004) 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。更多信息参见王教授个人网页: <http://www.nanoscience.gatech.edu/zwang/>

## 北京市明确十大重点发展的 技术标准领域和重点标准方向

北京市质量技术监督局 2006 年 12 月 4 日正式发布《北京市重点发展的技术标准领域和重点标准方向 (2006-2010)》。主要包括: 超大规模集成电路用配套材料、新型元器件基础材料等电子信息相关材料及器件标准; 纳米检测技术; 纳米材料毒性效应; 环境和人体的安全性; 纳米材料与产品的安全性评价; 纳米技术材料的安全标准; 纳米化纤产品的评价等方面的标准等。

采自 (新华网)