



史铁林 SHI Tielin

长江学者特聘教授

Chang Jiang Scholar

华中科技大学机械科学与工程学院
教授、博士生导师

Professor and Doctor Advisor of School
of Mechanical Science & Engineering,
Huazhong University of Science and
Technology

教育部“微纳制造与纳米测量技术”
创新团队负责人,中国振动工程学会常
务理事、中国振动工程学会动态信号分
析专业委员会主任委员,中国振动工程
学会故障诊断专业委员会副主任委员,
中国微米纳米技术学会理事。先后获多
项中国青年科技奖、全国优秀博士后、湖
北省五四青年奖章、中国机械工程学会
杰出青年科技奖和首批“新世纪百千万
人才工程”国家级人选等荣誉称号。发
表学术论文 250 余篇,其中 SCI 收录 150
多篇,申请国家发明专利 80 多项,授权
50 多项。

先进纳米制造技术及应用

——访长江学者特聘教授、华中科技大学机械科学与工程学院教授史铁林

Advanced Nano Manufacturing Technology and Its Applications

本刊记者 谷雨

☞: 纳米技术、信息技术和生物技术并列为 21 世纪的三大科技,而纳米制造则是支撑它们走向应用的基础。那么,纳米制造是如何定义的?其主要特征是什么?

史铁林: 美国科学基金会将纳米制造定义为构建适用于跨尺度集成的、可提供具有特定功能的产品和服务的纳米尺度的结构、特征、器

件和系统的制造过程。纳米制造已远远超出常规制造的理论和技术范畴,相关技术的发展将依赖于新的科学原理和理论基础,依赖于多学科交叉融合。纳米制造从牛顿力学、宏观统计分析和工程经验为主要特征的传统制造技术走向基于现代多学科综合交叉集成的先进制造科学与技术。其主要特征在于:(1) 制造

对象与过程涉及跨尺度;(2) 制造过程中界面/表面效益占主导作用;(3) 制造过程中原子/分子行为及量子效应影响显著;(4) 制造装备中微扰动影响显著。

☞: 纳米制造的关键结构从尺度上主要体现为结合微米与纳米的跨尺度制造和纳米范畴的纳尺度制造,请介绍一下这两种关键结构的特

点,以及您的团队在该领域取得的成果。


史铁林: 跨尺度集成制造是将不同尺度的结构组合、加工形成多尺度整体的过程。微纳集成结构可以根据它们的结构特性分为无序分级结构、一维纳米分支结构、层叠分级结构、几何形状可控分级结构和纳米悬浮分级结构等。微纳集成结构可以有不同的形状、尺寸、层数等几何特征,其关键的一点是要实现纳结构在微结构上的定点、可控集成。稳定的微纳集成结构不仅能为研究纳米材料的光、电等方面的性能提供方便,还可能为功能微/纳米电子器件的研制打下基础。在微纳结构的集成过程中,微结构界面的各种因素都会对纳米结构集成效果带来较大影响,因此研究微环境对纳结构形成的影响机理,实现微环境的精确控制,是控制纳米结构定域、定向和定尺度生长的关键因素。对于微纳集成结构而言,它继承了微结构的宏观特性,并且兼具纳米结构的表面效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应等特性,同时还呈现出单个纳米基元所不具备的新性质,如由于纳米基元组合引起的量子耦合效应和协同效应等。研究表明,微纳跨尺度集成结构具有改进的结构功能、器件性能,在仿生、生物医药、微/纳流体、光子和电子等众多器件中具有巨大的应用潜力。

本团队前期对微纳复合结构的批量化制造技术展开了深入研究,实现了硅及金属氧化物微纳复合结构的大面积可控制备;提出了碳化辅助纳米结构集成的微纳结构集成制造新原理,以及碳微图形化的演变规律和三维悬浮纳米结构的生成机理;发现了碳微结构表面集成类石墨薄膜纳米褶皱结构的新现象,揭示了纳米褶皱结构的生成机理;提出了C-MEMS/NEMS制造新方法和新工艺,开发了优化的C-MEMS制造工

艺以及规模化组装CNT的微纳集成制造新工艺,开发了同质/异质低维纳米线结构在C-MEMS结构上的一体化生长集成可控制造工艺。

纳米尺度制造指制造的结构尺寸在纳米量级,目前正朝着更小尺度的量子点制造方向发展。纳米制造的方法通常分为2种,一种是Top-Down(自上而下)高精度加工,另一种是Bottom-Up(自下而上)的直接构建。这2种方法的主要区别是:对于自上而下的方法,零件和芯片已经是图案,因此不需要自组装步骤,已经成为微电子和计算机等行业持续发展的关键工具,但未来面临越来越接近其固有尺寸极限等诸多障碍和挑战;自下而上工艺主要包括自组装技术和各类沉积与生长技术。

本团队针对硅基纳米结构的规模化可控制造技术进行了细致研究。通过结合纳米球自组装与金属催化刻蚀,实现了高深宽比硅纳米线的可控制备;通过纳米压印等图形化工艺结合反应离子刻蚀,实现了大面积硅纳米阵列的制备;利用基于CVD设备的气-液-固(VLS)工艺,实现了硅纳米线结构的生长;揭示了碳化辅助的纳米结构生长和集成机制;针对金属氧化物纳米结构的可控制备技术也取得了一系列进展。

: 微纳结构独特的优异性能及对微纳制造基础科学的广泛而深入研究为纳米技术的应用提供了巨大的探索空间和应用原型,请谈谈纳米制造技术目前的应用情况。

史铁林: 微纳制造基础科学研究是支撑纳米科技走向应用的基础,已成为当前的研究热点和国际上高科技领域竞争的焦点之一,并在传感检测、新能源开发、能量转换和储存及生物技术等领域取得了飞速的发展。

纳米制造技术在传感检测中具有广泛的应用。使用纳米结构制备的传感器由于具有更大的比表面积

和更高的纵横比,在灵敏度和选择性方面更具优势,目前已引起越来越多的关注。例如,ZnO的各类纳米结构被探索应用于有毒气体检测,同时利用其压电效应及光电效应制备的压力传感、光学传感以及纳米发电机等器件均表现出了良好的性能。

随着能源危机与环境问题日益突出,纳米制造技术在太阳能电池、照明、锂电池、光催化等方面的应用研究受到高度关注。传统单晶硅太阳能电池的转化效率较高,且已有工业应用,但对硅的纯度要求很高,导致成本过高。本团队在印刷碳对电极钙钛矿太阳能电池制备方面已取得显著进展。发光二极管(Light Emitting Diode, LED)是一种以半导体为发光材料的发光组件,被称为绿色光源,具有节能省电、环保、寿命长、体积小、响应快、抗振动等优点。纳米结构的引入,能够有效提高LED器件的性能,降低能耗。基于纳米结构的锂离子电池和超级电容等能量储存器件和系统近年来的高速发展,能够有效提高储能器件的性能。

在气敏传感方面,本团队以具有优异光学特性的Morpho蝴蝶为对象,揭示了Morpho磷翅微纳结构特点与光学特性的关系,以及该微纳结构对环境氛围敏感的机理。试验验证了其优异的光学特性及对液体介质、气体介质敏感效果。以制备具有优异特性的仿生微纳结构为目标,提出采用AFM与ICP工艺相结合,用于微纳尺度的结构或模板制备;提出采用ICP与电子束蒸发、湿法刻蚀相结合的分层复杂微纳结构制备方法、ICP与纳米线刻蚀/生长相结合的仿生微纳结构制备方法,制备出了仿蝴蝶磷翅等微纳结构,并初步验证了该仿生结构的优异光学特性。在能量转换方面,本团队深入开展了基于钙钛矿的高性能太阳能器件研制,取得了丰硕的成果。

(责编 大漠)