



教育部高等学校
材料科学与工程教学指导委员会规划教材

● 丛书主编 黄伯云

纳米材料学基础

主 编 陈翌庆 石 瑛
主 审 俞书宏

Fundamentals of Nanomaterials



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



教育部高等学校
材料科学与工程教学指导委员会规划教材

● 丛书主编 黄伯云

纳米材料学基础



主编 陈翌庆 石瑛
主审 俞书宏

Fundamentals of Nanomaterials



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

纳米材料学基础/陈翌庆主编. —长沙:中南大学出版社,2008.12

ISBN 978-7-81105-705-8

I. 纳... II. 陈... III. 纳米材料—高等学校—教材

IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 191437 号

纳米材料学基础

主编 陈翌庆 石 瑛

☐责任编辑 周兴武

☐责任印制 汤庶平

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

☐印 装 湖南大学印刷厂

☐开 本 787×960 1/16 ☐印张 13.5 ☐字数 313 千字

☐版 次 2009 年 1 月第 1 版 ☐2009 年 1 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-81105-705-8

☐定 价 28.00 元

图书出现印装问题,请与出版社调换

内 容 简 介



本书为教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会规划教材,根据教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会制定的本课程“教学基本要求”编写。

本书除绪论外,共分6章,第1章为纳米材料的物理学基础,第2章为纳米材料的基本效应,第3章为零维纳米材料,第4章为一维纳米材料,第5章为有序纳米结构及其应用,第6章为纳米固体及其制备。

本书特色在于对当今迅猛发展的纳米材料科学技术的知识点进行了认真的梳理和凝练,从教材的编写特点和要求出发,以“维度”作为教学线索,力图使学生通过学习掌握纳米材料奇异性能的本质和基本原理,掌握纳米材料合成、制备方法的内在规律和一些共性原理。使学生不但要知其然,还要知其所以然,以达到“授人以渔”的目的。

本书条理清晰,深入浅出,便于教学,可作为高校高年级本科生和研究生的教材,也可供相关专业师生、科技人员、工程技术人员参考。

教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会规划教材

编 审 委 员 会

主 任

黄伯云(教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会主任委员、中国工程院院士、中南大学教授、博士生导师)

副主任

姜茂发(分指委*主任委员、东北大学教授、博士生导师)

吕 庆(分指委副主任委员、河北理工大学教授、博士生导师)

张新明(分指委副主任委员、中南大学教授、博士生导师)

陈延峰(材物与材化分指委**副主任委员、南京大学教授、博士生导师)

李越生(材物与材化分指委副主任委员、复旦大学教授、博士生导师)

汪明朴(教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会秘书长、中南大学教授、博士生导师)

委 员

(以姓氏笔画为序)

于旭光(分指委委员、石家庄铁道学院教授)

韦 春(桂林工学院教授、博士生导师)

王 敏(分指委委员、上海交通大学教授、博士生导师)

介万奇(分指委委员、西北工业大学教授、博士生导师)

水中和(武汉理工大学教授、博士生导师)

孙 军(分指委委员、西安交通大学教授、博士生导师)

刘 庆(重庆大学教授、博士生导师)

刘心宇(分指委委员、桂林电子科技大学教授、博士生导师)

刘 颖(分指委委员、北京理工大学教授、博士生导师)

朱 敏(分指委委员、华南理工大学教授、博士生导师)

注：* 分指委：全称教育部高等学校金属材料工程与冶金工程专业教学指导分委员会；

** 材物与材化分指委：全称教育部高等学校材料物理与材料化学专业教学指导分委员会。

曲选辉(北京科技大学教授、博士生导师)
任慧平(教育部高职高专材料类教学指导委员会主任委员、内蒙古科技大学教授)
关绍康(分指委委员、郑州大学教授、博士生导师)
阮建明(中南大学教授、博士生导师)
吴玉程(分指委委员、合肥工业大学教授、博士生导师)
吴化(分指委委员、长春工业大学教授)
李强(福州大学教授、博士生导师)
李子全(分指委委员、南京航空航天大学教授、博士生导师)
李惠琪(分指委委员、山东科技大学教授、博士生导师)
余志明(中南大学教授、博士生导师)
余志伟(分指委委员、东华理工学院教授)
张平(分指委委员、装甲兵工程学院教授、博士生导师)
张昭(分指委委员、四川大学教授、博士生导师)
张涛(分指委委员、北京航空航天大学教授、博士生导师)
张文征(分指委委员、清华大学教授、博士生导师)
张建新(河北工业大学教授)
张建勋(西安交通大学教授、博士生导师)
沈峰满(分指委秘书长、东北大学教授、博士生导师)
杨贤金(分指委委员、天津大学教授、博士生导师)
陈文哲(分指委委员、福建工程学院教授、博士生导师)
陈翌庆(材料与材化分指委委员、合肥工业大学教授、博士生导师)
周小平(湖北工业大学教授)
赵昆渝(昆明理工大学教授、博士生导师)
赵新兵(分指委委员、浙江大学教授、博士生导师)
姜洪义(武汉理工大学教授、博士生导师)
柳瑞清(江西理工大学教授)
聂祚仁(北京工业大学教授、博士生导师)
郭兴蓬(材料与材化分指委委员、华中科技大学教授、博士生导师)
黄晋(分指委委员、湖北工业大学教授)
阎殿然(分指委委员、河北工业大学教授、博士生导师)
蒋青(分指委委员、吉林大学教授、博士生导师)
蒋建清(分指委委员、东南大学教授、博士生导师)
潘春旭(材料与材化分指委委员、武汉大学教授、博士生导师)
戴光泽(分指委委员、西南交通大学教授、博士生导师)

总序

材料是国民经济、社会进步和国家安全的物质基础与先导,材料技术已成为现代工业、国防和高技术发展的共性基础技术,是当前最重要、发展最快的科学技术领域之一。发展材料技术将促进包括新材料产业在内的我国高新技术产业的形成和发展,同时又将带动传统产业和支柱产业的改造和产品的升级换代。“十五”期间,我国材料领域在光电子材料、特种功能材料和高性能结构材料等方面取得了较大的突破,在一些重点方向迈入了国际先进行列。依据国家“十一五”规划,材料领域将立足国家重大需求,自主创新、提高核心竞争力、增强材料领域持续创新能力将成为战略重心。纳米材料与器件、信息功能材料与器件、高新能源转换与储能材料、生物医用与仿生材料、环境友好材料、重大工程及装备用关键材料、基础材料高性能化与绿色制备技术、材料设计与先进制备技术将成为材料领域研究与发展的主导方向。不难看出,这些主导方向体现了材料学科一个重要发展趋势,即材料学科正在由单纯的材料科学与工程向与众多高新科学技术领域交叉融合的方向发展。材料领域科学技术的快速进步,对担负材料科学与工程高等教育和科学研究双重任务的高等学校提出了严峻的挑战,为迎接这一挑战,高等学校不但要担负起材料科学与工程前沿领域的科学研究、知识创新任务,而且要担负起培养能适应材料科学与工程领域高速发展需求的、具有新知识结构创新型高素质人才的重任。

为适应材料领域高等教育的新形势,2006—2010年教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会积极组织材料类高等学校教材的建设规划工作,成立了规划教材编审委员会,编审委员会由相关学科的分教学指导委员会主任委员、委员以及全国30余所有影响力和代表性的高校材料学院院长组成。编审委员会分别于2006年10月和2007年5月在湖南张家界和中南大学召开了教材建设研讨会和教材提纲审定会。经教学指导委员会和编审委员会推荐和遴选,逾百名来

自全国几十所高校的具有丰富教学与科研经验的专家、学者参加了这套教材的编写工作。历经几年的努力,这套教材终于与读者见面了,它凝结了全体编写者与组织者的心血,充分体现了广大编写者对教育部“质量工程”精神的深刻体会,对当代材料领域知识结构的牢固掌握和对高等教育规律的熟练掌握,是我国材料领域高等教育工作者集体智慧的结晶。

这套教材基本涵盖了金属材料工程专业的主要课程,同时还包含了材料物理专业和材料化学专业部分专业基础课程,以及金属、无机非金属和高分子三大类材料学科的实验课程。整体看来,这套教材具有如下特色:①根据教育部高等学校教学指导委员会相关课程的“教学大纲”及“基本要求”编写;②统一规划,结构严谨,整套教材具有完整性、系统性,基础课与专业课之间的内容有机衔接;③注重基础,强调实践,体现了科学性、实用性;④编委会及作者由材料领域的院士、知名教授及专家组成,确保了教材的高质量及权威性;⑤注重创新,反映了材料科学领域的新知识、新技术、新工艺、新方法;⑥深入浅出,说理透彻,便于老师教学及学生自学。

教材的生命力在于质量,而提高质量是永恒的主题。希望教材的编审委员会及出版社能做到与时俱进,根据高等教育改革和发展的形势及材料专业技术发展的趋势,不断对教材进行修订、改进、完善,精益求精,使之更好地适应高等教育人才培养的需要,也希望他们能够一如既往地依靠业内专家,与科研、教学、产业第一线人员紧密结合,加强合作,不断开拓,出版更多的精品教材,为高等教育提供优质的教学资源和服务。

衷心希望这套教材能在我国材料高等教育中充分发挥它的作用,也期待着在这套教材的哺育下,新一代材料学子能茁壮成长,脱颖而出。

董伯云

2008年9月

前 言



纳米材料核心的内容是“材料奇异的性能和材料尺度、维度相关联”，因此我们要让学生通过学习，弄清为什么纳米材料的性能和尺寸、维度密切相关，尺寸和维度如何影响着纳米材料的电子结构、表面性质等等，进而影响纳米材料的物理、化学等性能。基于这一思路，我们先编写有关纳米材料的物理学基础，使学生理解量子尺寸效应等基本效应，从而能够正确分析和理解纳米材料特异性能的物理本质。纳米材料往往通过制备成功能纳米器件或工程纳米块体材料实现其应用，但无论是功能纳米器件中的纳米结构(图案)体系还是纳米块体材料，一般都是由纳米“基本单元”构筑的，因此，本教材以维度为线索，依次讲解零维和一维纳米材料的制备(合成)、电子结构和物理、化学特性。在此基础上，再讲授纳米块体材料和应用于纳米器件中的有序纳米结构。另外，编者还注意到不同维度纳米材料除了电子结构不同，其合成(生长)机理往往也不相同。不同维度纳米材料的生长自身有一定的规律性可循，因此制备过程不应该是一些事例的简单堆砌，而是应该找出各种制备方法中的内在规律和一些共性原理。这样，同学们就不会死记硬背一些具体制备(合成)事例，而是通过运用基本原理“举一反三”地开展一些新方法的研究和探索，这就是我们想要达到的“授人以渔”的目的。

本教材绪论和第4章4.1~4.2节由合肥工业大学陈翌庆教授编写，第1章由合肥工业大学周如龙博士编写，第2、3、6章以及第4章4.3节由武汉大学石瑛教授编写，第5章由合肥工业大学贾冲副教授编写。全书由陈翌庆教授负责制定编写大纲，筹划协调和修订稿件，中国科学技术大学俞书宏教授主审。

在编写过程中得到合肥工业大学、武汉大学和中南大学等有关领导和教师的大力支持，中南大学出版社的领导和周兴武主任为本书的出版做了大量细致的工作。合肥工业大学张新华、周庆涛博士为本书的图表做了大量绘制工作，在此一并向他们表示衷心感谢！由于编者水平、能力有限，书中难免有错漏和达不到要求之处，诚恳希望读者批评指正。

编者

2008年12月

目 录

绪 论	(1)
0.1 纳米科技的内涵和发展	(1)
0.2 纳米材料的概念	(3)
0.3 纳米材料的研究对象和研究内容	(4)
0.3.1 纳米“基本单元”	(4)
0.3.2 纳米结构和纳米块体	(4)
第1章 纳米材料的物理学基础	(7)
1.1 周期纳米结构的物理学	(7)
1.1.1 理想周期结构的能带	(7)
1.1.2 能带中电子的准经典运动和有效质量	(13)
1.1.3 有效质量方程	(17)
1.1.4 量子束缚与能态密度	(20)
1.2 零维纳米颗粒的基本物理效应	(23)
1.2.1 量子尺寸效应和久保理论	(23)
1.2.2 久保理论的修正与完善	(29)
思考题	(35)
第2章 纳米材料的基本效应	(36)
2.1 量子尺寸效应	(36)
2.2 小尺寸效应	(37)
2.3 表面效应	(39)
2.4 库仑堵塞效应	(39)
2.5 量子隧穿效应	(40)
思考题	(42)
第3章 零维纳米材料	(43)
3.1 零维纳米材料的制备技术	(44)
3.1.1 气相法制备	(44)
3.1.2 液相法制备	(48)

3.1.3 固相法制备	(52)
3.2 零维纳米材料的物理化学性质	(57)
3.2.1 热学性质	(57)
3.2.2 光学性质	(59)
3.2.3 磁学性质	(61)
3.2.4 化学性质	(64)
思考题	(69)
第4章 一维纳米材料	(70)
4.1 一维纳米材料的合成制备	(70)
4.1.1 气相法制备	(70)
4.1.2 液相法制备	(83)
4.1.3 模板法制备	(86)
4.2 一维半导体纳米线的物性	(98)
4.2.1 单根纳米线的电学传输	(99)
4.2.2 单根纳米线的光学性质	(101)
4.3 碳纳米管	(103)
4.3.1 碳纳米管的结构	(104)
4.3.2 碳纳米管的制备	(106)
4.3.3 碳纳米管的性质	(108)
4.3.4 碳纳米管的应用	(110)
思考题	(111)
第5章 有序纳米结构及其应用	(112)
5.1 纳米刻蚀技术	(113)
5.1.1 极紫外光刻(EUVL)和X射线光刻(XRL)	(113)
5.1.2 电子束刻蚀(EBL)和离子束刻蚀(IBM)	(118)
5.1.3 纳米压印技术(NIL)	(120)
5.1.4 其他几种纳米刻蚀技术	(123)
5.2 自组装技术	(126)
5.2.1 微观粒子间的相互作用能	(127)
5.2.2 表面活性剂分子的自组装	(130)
5.2.3 微乳液法自组装	(132)
5.2.4 利用范德瓦尔斯力自组装	(135)
5.2.5 利用静电力自组装	(136)

5.2.6 模板法自组装	(137)
5.2.7 气相催化自组装	(139)
5.2.8 利用表面张力和毛细管力自组装	(140)
5.2.9 取向搭接自组装	(144)
5.3 自下而上和自上而下相结合制备有序纳米结构	(146)
5.3.1 模板诱导自组装	(146)
5.3.2 刻蚀辅助的 LB 膜自组装	(147)
5.3.3 刻蚀催化图形自组装	(149)
5.4 有序纳米结构的应用	(152)
5.4.1 电子器件研究领域的应用	(152)
5.4.2 光学器件研究领域的应用	(158)
5.4.3 磁学器件研究领域的应用	(162)
5.4.4 环境检测研究领域的应用	(164)
5.4.5 高效能量转化研究领域的应用	(165)
5.4.6 催化研究领域的应用	(167)
5.4.7 医学研究领域的应用	(168)
思考题	(170)
第 6 章 纳米固体及其制备	(171)
6.1 纳米金属与合金材料的制备	(172)
6.2 纳米相陶瓷的制备	(177)
6.3 纳米固体材料的性能	(182)
6.3.1 力学性能	(182)
6.3.2 热学性能	(184)
6.3.3 光学性能	(186)
6.3.4 电学性能	(187)
6.3.5 磁学性能	(189)
思考题	(196)
参考文献	(197)

绪 论

0.1 纳米科技的内涵和发展

纳米科技是在 20 世纪 80 年代末、90 年代初才逐步发展起来的前沿、交叉性新兴学科领域,它的迅猛发展将在 21 世纪促使几乎所有工业领域产生一场革命性的变化。

纳米科技是指在纳米尺度($1 \sim 100 \text{ nm}$ 即 $10^{-9} \sim 10^{-7} \text{ m}$)上研究物质(包括原子、分子的操纵)的特性和相互作用以及利用这些特性的多学科交叉的科学和技术。当物质小到 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 时,由于其量子效应、物质的局域性及巨大的表面及界面效应,使物质的很多性能发生质变,呈现出许多既不同于宏观物体,也不同于单个孤立原子的奇异现象。纳米科技的最终目标是直接利用原子、分子及物质在纳米尺度上表现出来的新颖的物理、化学和生物学特性制造出具有特定功能的产品。

1959 年,著名物理学家、诺贝尔奖获得者理查德·费曼(Richard P. Feynman)预言,人类可以用小的机器做更小的机器,最后将变成根据人类意愿,逐个地排列原子,制造产品,这是关于纳米技术最早的梦想。

20 世纪 70 年代,科学家从不同角度提出有关纳米科技的构想,1974 年,日本东京科技大学谷口纪男(Taniguchi)最早使用纳米技术一词描述精密机械加工。

1982 年,科学家发明研究纳米的重要工具——扫描隧道显微镜,为我们揭示一个可见的原子、分子世界,对纳米科技发展产生了积极促进作用。

1990 年 7 月,第一届国际纳米科学技术会议在美国巴尔的摩(Baltimore)举办,标志着纳米科学技术的正式诞生。

1991 年,碳纳米管(图 0-1)被人类发现,它的质量是相同体积钢的 $1/6$,强度却是钢的 10 倍,成为纳米技术研究的热点。诺贝尔化学奖得主斯莫利(Smalley)教授认为,纳米碳管将是未来最佳纤维的首选材料,也将被广泛用于超微导线、超微开关以及纳米级电子线路等。

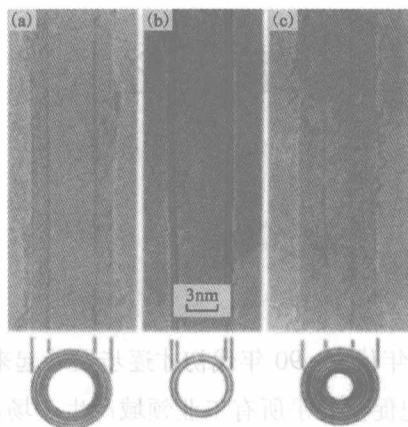


图 0-1 1991 年 Iijima 发现碳纳米管 (Carbon nanotube, CNT)

继 1989 年美国斯坦福大学搬走原子团“写”下斯坦福大学英文名字、1990 年美国国际商用机器公司在镍表面用 36 个氩原子排出“IBM”(图 0-2)之后,1993 年,中国科学院北京真空物理实验室自如地操纵原子成功写出“中国”二字(图 0-3),标志着我国开始在国际纳米科技领域占有一席之地。

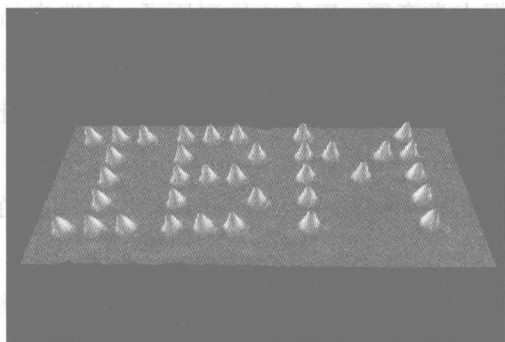


图 0-2 美国国际商用机器公司 (IBM) 在镍表面用 36 个氩原子排出“IBM”字样

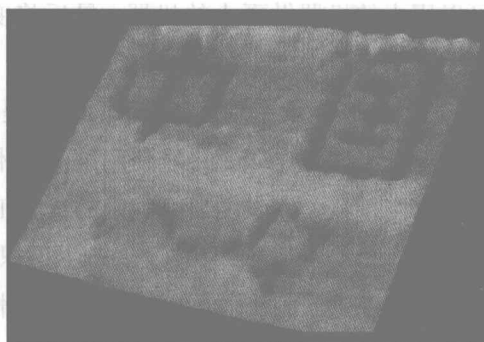


图 0-3 中国科学院北京真空物理实验室操纵原子写出的“中国”二字

1997 年,美国科学家首次成功地用单电子移动单电子,利用这种技术可望在 20 年后研

制成功速度和存贮容量比现在提高成千上万倍的量子计算机。

1999年,巴西和美国科学家在进行纳米碳管实验时发明了世界上最小的“秤”,它能够称量十亿分之一克的物体,即相当于一个病毒的重量;此后不久,德国科学家研制出能称量单个原子重量的秤,打破了美国和巴西科学家联合创造的纪录。

2007年初,基于压电电子学原理,佐治亚理工学院教授、中国国家纳米科学中心海外主任王中林教授研究小组用超声波带动纳米线阵列运动,研制出能独立从外界吸取机械能、并将之转化为电能的纳米发电机模型(图0-4)。在超声波带动下,这种纳米发电机已能产生上百纳安的电流。

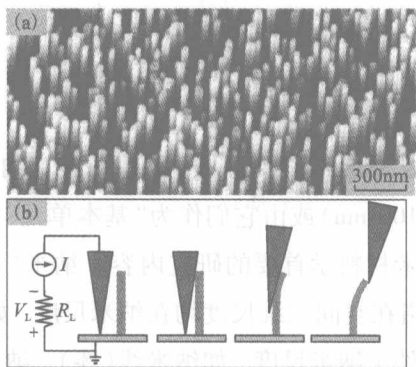


图0-4 基于有序氧化锌纳米线阵列的纳米发电机

0.2 纳米材料的概念

纳米材料是纳米科技发展的基础。什么是纳米材料?纳米材料必须同时满足两个基本条件:①在三维空间中至少有一维处于纳米尺度(1~100nm)或由它们作为“基本单元”(building blocks)构建的材料;②与块体材料(bulk materials)相比,在性能上有突变或者大幅提高的材料。如果仅在尺寸上满足了条件,但不具有尺寸减小所产生的奇异性能,那还不是纳米材料。

纳米材料的本质在于:当材料进入纳米尺度时,材料的物性之间由几个与尺度效应、边界效应等直接相关的特征物理尺度(如电子的德布罗意波长、波尔激子半径、隧穿势垒厚度、铁磁性临界尺寸等)所决定。只要结构几何尺寸接近这些特征物理尺度(绝大部分在纳米科学定义的尺度范围内),材料的电子结构、输运、磁学、光学、热力学和力学性能均要发生明显的变化。在这些特征尺度内,物质的局域场强度与外场强度可比拟,局域场、外场、原子分子构型形变的耦合变得突出,原子间相互位置或分子构型的变化必然引起局部电子云密度变化和纳米尺度物质的物理、生化性能变化。

0.3 纳米材料的研究对象和研究内容

0.3.1 纳米“基本单元”

从纳米材料的定义中可以看出, 纳米材料是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺度(1~100 nm)或由它们作为“基本单元”(building blocks)构建的材料, 因此, 纳米“基本单元”是纳米材料学首要的研究内容。纳米“基本单元”一般按照空间维度来分, 分为三类: ①零维, 指在空间三维尺度均在纳米尺度, 如纳米尺度颗粒、原子团簇等; ②一维, 指在空间二维尺度处于纳米尺度, 如纳米线(棒)、纳米管等; ③二维, 指在空间三维尺度中有一维在纳米尺度, 如超薄膜、多层膜、超晶格等等。由于这些“基本单元”往往具有量子性质, 所以零维、一维、二维的纳米“基本单元”分别又有量子点、量子线和量子阱之称。

纳米材料学首先要研究这些纳米“基本单元”的合成、结构、性能及其应用, 从而为进一步研究这些“基本单元”构造的纳米材料及其应用奠定基础。

二维纳米材料主要是一些纳米尺度的薄膜材料, 已有《薄膜材料与薄膜技术》、《薄膜物理与技术》等专门课程讲授。因此, 本书主要讲授零维和一维纳米材料方面的内容。

0.3.2 纳米结构和纳米块体

纳米材料的应用需要构建由纳米“基本单元”组成的纳米结构(nanostructure)进而组装成纳米器件或制备成由纳米“基本单元”组成的纳米块体材料以及在工程中的应用。纳米块体材料通常是先制备成纳米粉体再将其压制成纳米块体, 德国萨尔大学格莱德和美国阿贡国家实验室席格先后研究成功纳米陶瓷氟化钙和二氧化钙, 在室温下显示良好的韧性, 在180℃经受弯曲并不产生裂纹, 这一突破性进展, 使那些为陶瓷增韧奋斗将近一个世纪的材料科学家们看到了希望。2000年, 中国科学院金属研究所卢柯研究小组利用电解沉积技术成功制备出高密度、高纯度的三维块状纳米晶Cu样品。该样品在室温条件下冷轧, 延伸率超过5100%, 具有超塑延展性(图0-5)。

纳米结构(纳米图案)是纳米“基本单元”按一定规律构筑的一种新的纳米结构体系。纳米结构一方面具有“基本单元”所充分展现出的量子效应, 同时又具有由纳米结构组合所引起的新的效应, 如量子耦合效应和协同效应等。此外, 纳米结构体系很容易通过外场(电、磁、

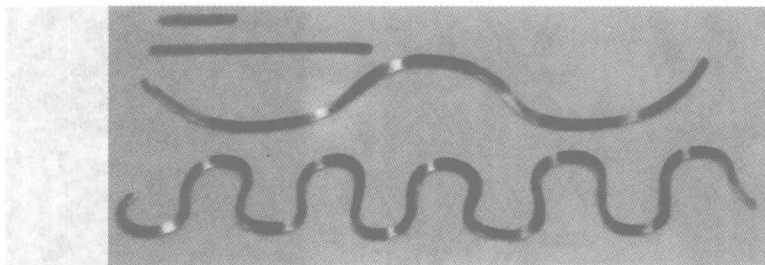


图 0-5 具有超塑延展性的纳米铜

光)实现对其性能的调控,因此纳米结构是功能纳米器件的设计基础。

纳米结构的制备路线有两种,分别为“自上而下”(top-down)和“自下而上”(bottom-up)。“自上而下”方法是指在宏观块体材料(如半导体)上利用蚀刻技术制造纳米尺度结构,如纳米蚀刻技术等。图 0-6 是利用“自上而下”方法通过电子束刻蚀技术生长的纳米原型器件。“自下而上”的方法是指人们按需要用一个个原子或一个个分子组装出新的纳米结构(纳米图案)或者新的器件。

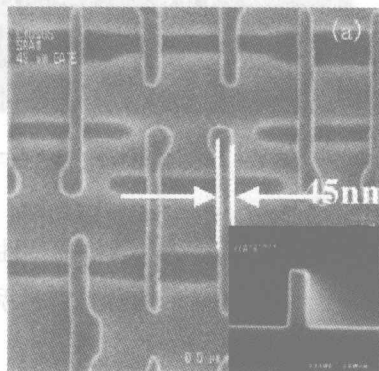


图 0-6 由“自上而下”方式通过电子束刻蚀技术生长的纳米原型器件

根据纳米结构体系构筑过程中的驱动力是靠外因还是内因大致划分为:一是人工组装;二是自组装。《纳米材料学基础》(本书)主要涉及自组装体系。如图 0-7 纳米结构自组装,是在合适的物理、化学条件下,原子、分子、粒子和其他结构单元,通过氢键、范德瓦尔斯键、静电力等非共价键的相互作用或亲水-疏水相互作用,在系统能量最低性原理的驱动下,自发地形成具有纳米结构(纳米图案)的过程;自组装也指如果体系拆分成相应的基本结构单元,在适当的条件下,这些基本结构单元会混合重新形成完整结构。

纳米结构的研究可为进一步研究纳米器件奠定基础。进入 21 世纪,美国宣布了一项新的国家计划——国家纳米技术计划(NNI)。它充分运用分子的自组织概念,根据人为设计来合成和加工纳米材料结构单元及系统组件;把构筑分子结构与超微型化结合起来,对纳米系