

现代科学思想库

纳米科学与技术

白春礼 ●



现代科学
思想库

现代科学
思想库

云南
科技
出版社

云南科技出版社

纳米科学 与技术

—— 白春礼

(滇)新登字 04 号

责任编辑:夏吉文 史青

封面设计:王玉辉

纳米科学与技术

白春礼 著

云南科技出版社出版发行 (昆明市书林街 100 号)

云南创力激光照排发展分公司排版 云南老年报印刷厂印装

开本:850×1168 1/32 印张:4.125 字数:10 万

1995 年 1 月第 1 版 1995 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 7-5416-0716-X/N·9 定价:12 元



白春禮同志近影

白春礼同志简介

白春礼同志,满族,现任中国科学院化学研究所副所长,研究员、博士生导师。

白春礼同志 1953 年 9 月 26 日生于辽宁丹东。1970 年中学毕业后到内蒙古生产建设兵团工作。1974 年秋季入北京大学化学系学习,1978 年毕业分配到中国科学院长春应用化学研究所工作,从事高分子均相催化剂的研究。同年考入中国科学院化学所,从师于著名化学家,北京大学唐有祺教授从事 X 射线晶体学、分子力学研究。1981 年获硕士学位,1985 年获博士学位。

1985 年,白春礼同志赴意大利参加国际晶体学暑期学校。同年 9 月,到美国著名的高等学府—加州理工学院从事博士后研究。在访美期间,在国际著名物理化学家、美国科学院院士、美国工程科学院院士 Baldeschwieler 教授的实验室里,研制成功了超高真空扫描隧道显微镜(STM),并用其首次观察到半导体化合物二硫化钼的表面形貌,在原子级水平上揭示了这类层状化合物表面结构的新特点。Baldeschwieler 教授评价“白博士在发展真空 STM 方面做出了重要贡献,是杰出青年科学家中的佼佼者”。

白春礼同志在 1987 年回国以后,为推动国内扫描隧道显微学领域工作,主持研制成功了我国第一台原子力显微镜(AFM)、计算机控制的扫描隧道显微镜、超高真空扫描隧道显微镜、激光原子力显微镜、低温扫描隧道显微镜。这些可适用于不同性质样品和不同环境条件的新型系列显微仪器达到原子级分辨率,其性能指标达到国际先进水平。由于这些科研成果集精密机械、电子、光学、计

计算机软、硬件和图象处理技术及结构化学基础等多学科知识于一身,以不同于国外的创新方式解决了一系列重要技术难题,先后获得三项国家发明专利,获国家科技进步二等奖一项(第一名),这也是我国第一项关于扫描隧道显微学领域的奖励,国家科技进步三等奖一项(第一名),中国科学院科技进步一等奖一项(第一名),二等奖两项(第一名和第四名)。这些新型系列显微仪器的研制成功,不仅从无到有,代表了我国在这一高技术领域的研究水平,而且为扫描隧道显微学的应用研究,奠定了必要的物质基础,对我国在这一领域工作的开展起到了先导和促进作用。

白春礼同志与同事及学生们在为拓宽 STM 和 AFM 的应用领域,做出了贡献。如首次用 STM 和 AFM 研究了 BEDT-TTF 电荷转移复合物、氮氧自由基有机铁磁体、 C_{60} LB 膜、聚苯胺等有机固体,方铅矿、辉银矿、辉钼矿、黝锡矿等矿物,卵磷脂双层膜、变性 DNA、胰岛素、多肽、烟草花叶病毒等生物材料,以及纳米硅、宇宙尘埃等。这些研究结果,在极高分辨率的水平上,解释了材料表面结构与样品制备、形成条件的关系。例如碱金属在半导体上的吸附已被国外许多研究者研究了 20 余年,但一些理论和间接实验结果有互相矛盾之处,对于钠原子在 GaAs(110)表面的吸附位、吸附行为等一直悬而未决。而白春礼同志与同事等却根据 STM 和 LEED 衍射实验结果,无歧义地确定了钠原子的吸附位,并详细研究了表面结构随着表面覆盖度的不同而产生的变化,以及钠原子在 Si(111)表面吸附所引起的表面重构,引起国外同行的重视。在用 STM 进行纳米级加工方面,白春礼及其同事们也得到了十分可喜的成果,如用计算机控制,在晶体表面刻写出线条宽度仅为 10nm 的文字与图案,对探索新型高密度信息存储方式和纳米科技的研究具有重要的实际意义。

白春礼同志在扫描隧道显微术应用方面的研究成果,已在国内外发表了 100 余篇论文,1992 年由上海科技出版社出版了国内

第一本在该领域的专著《扫描隧道显微术及其应用》，该书获 1993 年中国图书奖。其经过扩充修改的英文版专著年内将在德国的 Springer 公司出版发行。对这些研究成果，美、加、英、日、法、德、瑞士等国 100 余人索取发表的论文，并被目前世界上该领域仅有的五本专著中予以引用。《纳米科学与技术》一书，就是他研究成果的总结。

在国内外扫描隧道显微学领域的学术活动方面，白春礼同志都有积极和较大的影响，是一位重要的代表人物。他是全国扫描隧道显微学学术交流专业组组长，先后组织了一、二、三届全国 STM/STS 学术会议，到十余所高校和科研单位讲学，任中国科技大学和中国地质大学兼职教授，毫无保留地与国内同行交流经验，为国内外大专院校和科研院所提供了 20 余台扫描隧道显微镜和原子力显微镜，培养研究生 8 名，以各种方式积极促进国内在这方面工作的开展。

白春礼同志先后任中华全国青年联合会常委、中国青年科技工作者协会副会长、中国博士联合会副理事长、中国材料研究学会理事、中国晶体学会理事、中国真空学会理事、中国科学院工程师协会常务理事、《博士丛书》副主编、《物理》常务编委、《真空科学与技术学报》和《分析科学学报》编委，和在英国出版的杂志“J. Ultramicroscopy and Nanotechnology”海外编委，广泛开展国际学术交流与合作。曾先后到美、英、意、日、丹麦、瑞士等国进行学术交流、讲学，参加过 20 余次国际学术会议。参予组织了第二届国际扫描隧道显微学会议。在第二至第六届国际扫描隧道显微学会议上连续发表论文与报告，受到国外学者、专家的好评。经过国外专家的推荐和提议，1991 年在瑞士召开的第六届国际扫描隧道显微学会议上，白春礼同志代表中国，通过包括两位诺贝尔奖获得者在内的国际组织的投票确认，将这个历来只在发达国家召开的大型国际学术会议争取到中国主办，任第七届国际扫描隧道显微学学术

会议的学术委员会主席兼大会秘书长和在国外核心刊物上正式发表的论文集主编。任第一届亚洲 STM 国际会议(日本)3 人组织委员会委员、第三届国际纳米科学与技术会议(美国)国际学术委员会委员、第八届 STM 国际会议(美国)顾问委员会委员、Scanning Microscopy International 系列会议(美国、加拿大)组织委员会委员,成为国际学术界反映我国在扫描隧道显微学研究方面的代表人物。

白春礼同志自 1987 年回国后,先后任课题组长,研究室主任。1991~1992 年受日本文部省邀请,赴日本东北大学任客座教授。1992 年 7 月任中国科学院化学所分管科研、外事、图书、信息、专利、大型仪器中心和技术条件等方面工作的副所长,并兼任化学所学术委员会副主任、基础研究部主任和扫描隧道显微学研究室主任。1989 年获中国科学院青年科学家奖和中国化学会青年化学奖,同年国务院授予他“全国先进工作者”称号。1990 年获中国科协青年科技奖,同年人事部授予“国家级有突出贡献的中青年专家”称号。1991 年国家教委和国务院学位委员会授予他“有突出贡献的中国博士学位获得者”称号。1992 年被评为中国十大杰出青年,1993 年当选为第八届全国政协委员和妇女青年委员会委员,1994 年获中国青年科学家奖(化学)。

编者的话

在长期的物质生产和各种社会活动中,人类不断地认识世界和改造世界,创造了技术和科学。随着科学技术的整体化和高速发展,又将人类带进了新的世界。

现代科学技术是浩瀚无边的知识海洋,是伟大的精神力量,又能转化为强大的物质力量,和 19 世纪以前不同,现代科学技术已经同人类的物质生产活动大规模地携起手来,成为第一生产力。现代科学技术作为系统化的知识体系。探索世界的认识活动和现代化的社会建制的统一体,帮助人类成功地解决了许多理论问题和实践问题,有力地推动物质生产、经济、社会结构和体制、社会关系、生活方式、思维方式以至各种思想观念的急剧变革,而这些变革又带来许多新情况、新问题、新思想、新观念,形成了一系列灿若繁星的新兴学科,进一步使现代科学技术体系更有组织和更加完整,极大地丰富了人类思想文化宝库,现代科学技术在社会物质文明和精神文明建设中的巨大作用,使它日益变成社会进步的动力。

在开放和改革的伟大年代,振兴经济是我国现代化建设的中心。而振兴经济首先要振兴科技、推动科技进步。《现代科学思想库》就是力图通过总结概括和汇集整理现代科学技术的成就,传播新的科学知识、科学思想和科学理论,展示科学技术的新动向和新趋势,阐明科学技术在现代化建设中的地位和作用,以促进科学技术与社会主义现代化建设的结合,推动科学技术的新的飞跃。

《现代科学思想库》是一套具有时代特色反映现代科学技术最新成就的学术性丛书,由著名科学家、科学管理专家以及有较高科

学水平和理论素养的中青年专家撰写,收入本文库的专著,力求材料翔实,有独到见解,能切实反映科技前沿的研究成果和发展趋势,既有文献价值,又有现实指导意义,兼具提高和普及两种功能。适合大学生、研究生和高中级干部阅读,也可供具有高中文化水平的青年钻研现代科技之用。

本文库的编写和出版得到国家科委、中科院的领导和专家,以及许多科学家、理论家的支持和帮助,钱学森同志十分关心此书并给以具体指导,在此一并致谢。

《现代科学思想库》编委会

1994年10月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 纳米尺度的定义	(1)
§ 1.2 纳米科技的提出	(2)
§ 1.3 纳米科学与技术的重要意义及其发展	(4)
第二章 纳米机械学与微型机械	(8)
§ 2.1 概述	(8)
§ 2.2 微型机械研究的一些主要方向	(10)
§ 2.2.1 微型机械零件	(10)
§ 2.2.2 微型电机	(10)
§ 2.2.3 纳米尺度定位马达	(12)
§ 2.2.4 微型泵和微型阀	(14)
§ 2.2.5 传感器	(15)
§ 2.2.6 微能源	(16)
§ 2.2.7 超精度测量	(17)
§ 2.3 微机械的基础工艺和理论	(17)
§ 2.4 微机械的应用	(18)
§ 2.5 微机器人及其应用	(20)
§ 2.6 展望	(23)
第三章 纳米电子学	(26)
§ 3.1 半导体纳米级结构	(27)

§ 3.2 纳米级结构的制备	(29)
§ 3.2.1 光学光刻	(29)
§ 3.2.2 电子束光刻	(30)
§ 3.2.3 离子束技术	(30)
§ 3.2.4 SPM 方法	(31)
§ 3.2.5 直接生长方法	(31)
§ 3.3 纳米级结构中的电子输运	(32)
§ 3.3.1 量子线	(33)
§ 3.3.2 人造原子与量子点	(34)
§ 3.3.3 共振隧道二极管	(35)
§ 3.3.4 分子电子器件	(37)
§ 3.4 纳米级结构的光学性质	(38)
§ 3.5 纳米级结构的应用前景	(39)
第四章 纳米材料学	(42)
§ 4.1 纳米材料	(42)
§ 4.2 纳米材料的制备	(43)
§ 4.3 纳米材料的优异性能	(44)
§ 4.4 纳米材料研究的一些前沿课题	(46)
第五章 纳米生物学	(49)
§ 5.1 纳米生物学概念的提出	(49)
§ 5.2 纳米生物学领域的初步成果	(51)
§ 5.2.1 纳米化工厂	(51)
§ 5.2.2 生物传感器	(51)
§ 5.2.3 生物分子计算机元件	(51)
§ 5.2.4 生物分子计算机	(52)
§ 5.2.5 生物分子纳米机器人	(52)

§ 5.2.6 纳米分子马达	(52)
第六章 纳米化学	(54)
§ 6.1 大分子的合成及组装	(55)
§ 6.2 碳 60 分子	(56)
§ 6.2.1 碳 60 的发现	(57)
§ 6.2.2 超导新军	(58)
§ 6.2.3 化学新部落	(60)
§ 6.2.4 天外来客	(62)
第七章 扫描探针显微镜	(63)
§ 7.1 与隧道效应有关的显微镜	(64)
§ 7.1.1 扫描隧道显微镜	(64)
§ 7.1.2 扫描噪声显微镜	(75)
§ 7.1.3 扫描隧道电位仪	(76)
§ 7.1.4 弹道电子发射显微镜	(76)
§ 7.2 扫描力显微镜	(77)
§ 7.2.1 原子力显微镜	(77)
§ 7.2.2 其它扫描力显微镜	(80)
§ 7.2.3 扫描力显微镜的应用	(80)
§ 7.3 扫描离子电导显微镜	(82)
§ 7.4 扫描热显微镜	(83)
§ 7.5 光子扫描隧道显微镜	(84)
第八章 纳米级尺度上的表面加工	(86)
§ 8.1 概述	(86)
§ 8.2 STM 对表面的直接刻写	(88)
§ 8.2.1 在金属表面的刻写	(89)

§ 8.2.2 在半导体表面的刻写	(93)
§ 8.3 在抗蚀膜表面上的加工	(98)
§ 8.4 在溶液和气相环境中的加工	(101)
§ 8.4.1 在溶液加工	(102)
§ 8.4.2 在气相环境下加工	(103)
§ 8.5 操纵原子和分子	(104)
§ 8.5.1 操纵单个原子	(105)
§ 8.5.2 操纵分子和原子簇	(112)
§ 8.6 用其它扫描探针显微镜的加工	(114)
§ 8.6.1 在薄膜上的加工	(114)
§ 8.6.2 电荷存贮	(115)
§ 8.6.3 磁结构以及在界面上的刻写	(116)
§ 8.7 展望	(117)
后 记	(119)

第一章

绪 论

§ 1.1 纳米尺度的定义

纳米又称为毫微米,符号为 nm 或 $m\mu$,是 1 微米的千分之一。如果以我们日常生活中常用到的单位“米”(m)(1m=3 市尺)作为主单位的话,纳米在长度单位中所处的位置如表 1.1 所示。

表 1.1 长度单位

单位	缩写或符号	对主单位的比
米	m	主单位
分米	dm	1/10
厘米	cm	1/100
毫米	mm	1/1000
丝米	dmm	1/10000
忽米	cmm	1/100000
微米	μ	1/1000000
纳米	nm 或 $m\mu$	1/1000000000
埃	Å	1/10000000000

由表 1.1 可见,1 纳米等于 10^{-9} 米(十亿分之一米),是人类肉

眼不能分辨出来的很小的长度单位。一般人类头发丝的直径在 70 微米左右,即约为 70000 纳米。

组成自然界的最基本单位是原子,它们的大小必须用埃这个单位来量度。而由原子构成的分子,则大小不等。一般有机小分子在几个纳米至几十纳米之间。与生命有关的生物分子则大得多。表 1.2 列出一些与生物工程有关的微观物质的尺度。

表 1.2 与生物工程有关的微观物质结构的尺度

名 称	尺度数量级	名称	尺度数量级
人体感觉细胞	50—100 μm	细菌	1 μm
人卵细胞	100 μm	病毒	数百 nm
大多数植物细胞	25—50 μm	蛋白质分子	数十 nm
人体红细胞	27 μm	DNA 分子 20nm (螺距 3.4nm)	
人体红血球(最小)	5 μm	分子、原子	nm 级或 Å 级

目前定义的纳米尺度,泛指 0.1nm 到 100nm,亦即在 1 埃至 0.1 微米之间。

§ 1.2 纳米科技的提出

最早提出纳米尺度上科学和技术问题的是著名物理学家、诺贝尔奖获得者理查德·费曼。早在 1955 年,他在题为《在底部还有大量余地》的演讲中,就提出了这样一种设想:人类能够用宏观的机器制造比其体积小的机器,而这较小的机器可以制作更小的机器,这样一步步达到分子线度,即逐级地缩小生产装置,以至量后直接按意愿排列原子,制造产品。1959 年,他在美国物理学会的年会上又做了一个富有远见性的报告,并作了很多美妙的设想。1960 年的《科学与工程》杂志上发表了这篇预言性的文章。在这篇报告

中他设想了在原子和分子水平上操纵和控制物质,其中包括以下几点:

1. 如何将大英百科全书的内容记录到一个大头针头部那么小的地方。

2. 计算机微型化。

3. 重新排列原子。他提醒人类,如果有朝一日能按自己的主观意愿排列原子,世界将会发生什么样的奇迹?

4. 微观世界里的原子。在这种尺度上的原子和在体块材料中原子的行为表现不同。

在原子水平上,会出现新的相互作用力、新颖的性质以及千奇百怪的效应。对物理学家来说,一个原子一个原子地构建物质并不违背物理学规律。但是,由于科学技术水平的限制,在其后一二十年内,费曼的设想没有引起人们的重视。直到70年代,科学家们才开始从不同的角度,提出许多有关纳米科技的构想,但都未形成系统。1974年,Taniguchi最早使用纳米技术(Nanotechnology)一词描述精细机械加工,用这一个新词来强调当时的微米科技已不足以满足工业界的要求,需要有新的技术和新的精度标准。1977年,美国麻省理工学院德雷克斯勒教授提出,可以从模拟活细胞中的生物分子的人工类似物—分子装置开始研究,并称之为纳米科技。70年代末,德雷克斯勒访问了斯坦福大学,并成立了由他领导的纳米科技研究组。他在《纳米科技新纪元》一书中评价道:纳米科技给人类带来的变化将会像产业革命、抗菌素以及核武器给人类带来的变化那样深远。

1990年7月,第一届国际纳米科学技术会议在美国巴尔的摩与第五届国际扫描隧道显微学会议同时举办,《纳米科技》和《纳米生物学》两种国际性专业期刊也在同年相继问世。一门崭新的科学技术—纳米科学技术,经过30年的曲折道路,终于诞生了。有些30年前还是幻想的东西在当今已成为现实了。