

nano technology HANDBOOK

纳米技术 手册

〔日〕纳米技术手册编辑委员会 编

王鸣阳 郭成言 译
葛 璜 刘 彬



科学出版社
www.sciencep.com

图字: 01-2003-7982 号

内 容 简 介

本手册从基础到应用,共分为四篇,分别介绍电学、电子、信息、化学和生物等领域的纳米技术。第1篇首先介绍纳米技术的发展历史和基础理论,接着描述了纳米尺度的加工方法以及富勒烯和纳米管的两种纳米尺度下的特殊结构的特性和有关制造技术。第2篇以扫描电子显微镜为中心,介绍了在纳米尺度下进行测量、评价和分析的各种方法。第3篇集中论述了纳米技术在IT产业中的应用,不仅谈到了诸如各种半导体器件、存储器和显示器等装置,对于所谓的量子计算元件那样的未来器件也作了介绍。第4篇集中论述了包含有遗传信息在内的生物物质的分析、测量和控制方法以及纳米液相化学及其在医疗实践中的应用,并从纳米技术的观点概述了生物学和化学领域所使用的最新技术和所取得的最新成果。

本手册的撰稿人均是目前活跃在日本各相关领域第一线的研究人员和技术人员,因此手册反映了当前最新的研究成果。

本手册适于在理工科、农学、医学和药学等各个领域攻读的研究生以及在各种企业里工作的研究人员和技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

纳米技术手册/(日)纳米技术手册编辑委员会编;王鸣阳等译. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-013174-6

I. 纳… II. ①纳… ②王… III. 纳米材料-手册 IV. TB383-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 032998 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面制作:来佳音

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

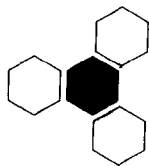
2005年1月第一次印刷 印张:54

印数:1—4 000

字数:1 222 000

定 价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)



前言

2000年初,美国前总统克林顿发表了篇名为《国家的纳米技术战略》的著名的国情咨文。自那时起,“纳米技术”作为我们这个时代的一个标志性词组,流行于世界。在那以前,包括日本在内的世界各国早就积极地进行了相关的研究,然而,只是在克林顿的那篇国情咨文发表之后,关于纳米技术的研究和开发工作才迅即成为了一个紧迫的问题。今天的形势,可以这样说,谁掌握了纳米技术,谁就拥有了世界。

“纳米技术”这个词虽然已经十分流行,但是至今仍然见不到一套全面系统地介绍纳米技术的文献资料。编写这套手册的目的,就是想让读者拥有一套系统介绍纳米技术的图书,希望能对纳米技术的研究和技术开发工作起到一些推动作用。

本手册的撰稿人均是目前活跃在各个领域第一线的研究人员和技术人员,手册中的内容反映了最新的研究成果。因此,阅读本手册不仅能够纵览纳米技术的全貌,而且有助于某个特定领域从事开发工作的研究人员能够从中找到他下一步该如何进行研究的线索。

纳米技术涉及的领域极其广阔,从电学、电子、信息到化学和生物等专业领域,几乎无所不包。因此,本手册也包括了从基础到各种应用的所有内容,按照“制作、观测和应用”的顺序组成了三大部分,但为了使用方便,本手册分为4篇来介绍。

在第1篇“制作”中,首先介绍了纳米技术的发展历史和基础理论,接着描述了纳米尺度的加工方法以及富勒烯(Fullerene)和纳米碳管的两种纳米尺度下的特殊结构的特性和有关的制造技术。

制造技术离不开观测方法。所以,在第2篇“观测”中,以扫描电子显微镜为中心,介绍了在纳米尺度下进行测量、评价和分析的各种方法。把第1篇和第2篇的内容结合起来阅读,便能够对处理纳米结构所使用的方法有一个基本的了解。

纳米技术既然称之为“技术”,那么,仅仅知道如何制造和评价纳米结构是不全面的,还需要从产业的角度去了解如何利用纳米尺度下的结构和现象,这就有了第3篇“在IT中的应用”。这一篇中集中论述了纳米技术在IT产业中的应用,不仅谈到了诸如各种半导体器件、存储器和显示器等装置,对于所谓的量子计算元件那样的未来器件也作了介绍。

进入 21 世纪,同 IT 产业相并列,生物和化学也成为两大支柱产业。生物和化学领域处理的对象,其自身就具有纳米尺度的结构。近年来,这两个领域采用了本来是在电学和机械等其他领域所使用的方法,相比较传统的技术它们取得了突破性进展。在第 4 篇“在生物学和化学中的应用”中,集中论述了包含有遗传信息在内的生物物质的分析、测量和控制方法以及纳米液相化学及其在医疗实践中的应用,并且从纳米技术的观点概述了生物和化学领域所使用的最新技术和所取得的最新成果。

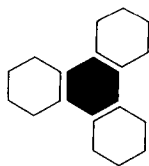
去年的物理学和化学两个诺贝尔奖项的评选结果使日本国民兴奋不已,人们一直津津乐道。但是,目前在学校就读的大学生同今天在第一线从事研究工作的研究人员之间,两者的水平差距愈加明显,因此,今后日本能否继续产生达到诺贝尔奖水平的研究成果和研究人员,实难预料。日本自诩“技术立国”,并订下了要在未来 50 年里争取有 30 人获得诺贝尔奖的奋斗目标,那么,如何才能培养出优秀的研究人员和技术人员,倒是一个需要认真探讨的课题。

从这种意义上说,倘若在理工科、农学、医学和药学等各个领域攻读的大学生以及在各种企业里工作的研究人员和技术人员能够广泛地使用本手册,并对日本纳米技术的发展做出贡献,我们将感到不胜荣幸。

最后,我要借此机会向本手册编辑委员会的各位委员表示感谢,他们在百忙中总是不遗余力地支持手册的编辑工作,担任了从讨论目录大纲到挑选撰稿人、调整原稿内容和校订等各种工作。当然,我也要向为本手册认真撰稿的各位撰稿人致以谢忱。

纳米技术编辑委员会委员长 难波 进





目 录

第 1 篇 制 作	1
导论 超微细加工的历史	3
第 1 章 纳米技术基础	16
1.1 从上至下和从下至上的纳米加工工艺(1)	16
1.2 从上至下和从下至上的纳米加工工艺(2)	22
1.3 微米和纳米尺度下的化学	28
1.4 生物科学和生物技术	31
参考文献	36
第 2 章 纳米尺度物理学	38
2.1 纳米尺度结构的物理学(1)	38
2.2 纳米尺度结构的物理学(2)	47
2.3 纳米尺度结构的物理学(3)	54
参考文献	59
第 3 章 纳米结构的制造及其特性	61
3.1 零维纳米结构	61
3.1.1 富勒烯	61
3.1.2 超微粒子	65
3.1.3 纳米团簇	67
3.1.4 量子点(S-K 晶体生长法, 抗表面活性剂法)	70
3.2 一维纳米结构	74
3.2.1 纳米碳管(纳米碳管和石墨纳米纤维)	74
3.2.2 金属纳米导线、纳米管和原子链	78
3.2.3 半导体量子细线	83
3.2.4 分子导线	87
3.3 二维纳米结构	91
3.3.1 量子阱和超晶格	91

3.3.2 磁性超薄膜	98
3.3.3 自发组织膜和电极	102
3.4 三维纳米结构	107
3.4.1 纳米金属	107
3.4.2 纳米陶瓷	113
3.4.3 多孔硅	118
3.4.4 沸石	122
3.4.5 纳米高分子	127
3.4.6 纳米玻璃	132
3.4.7 利用纳米物质制造三维纳米结构	136
3.4.8 超分子	141
3.4.9 树枝状高分子	144
参考文献	150
第4章 原子尺度结构的研制	161
4.1 原子或分子布线	161
4.2 原子开关	165
4.3 分子开关	168
4.4 有机晶体管	172
4.5 实现对表面原子阶梯的控制	176
4.6 原子层次的平滑面	180
4.7 超平坦面的机械加工	189
参考文献	193
第5章 纳米结构的制作技术	198
5.1 能量束应用技术	198
5.1.1 电子束纳米制版技术	198
5.1.2 聚焦离子束立体纳米结构的制作	202
5.1.3 光子束纳米制版技术	207
5.2 通向 MEMS 和 NEMS	212
5.3 LIGA 加工	216
5.4 纳米蚀刻加工技术	222
5.5 局部淀积法	228

5.6 选择生长法	233
5.7 飞秒激光加工	237
5.7.1 双光子光聚合加工	237
5.7.2 多光子玻璃加工	240
5.7.3 细胞的多光子纳米刺激和加工	244
5.7.4 紫外线加工	247
参考文献	251
第 6 章 纳米结构的大量合成	256
6.1 富勒烯	256
6.2 纳米碳管	260
6.3 纳米粒子	265
参考文献	269
第 7 章 纳米图形的原子光学制作	271
7.1 原子光学和图形制作	271
7.2 图形的近场原子光学制作	274
7.3 利用原子光学制作金属图形	278
参考文献	283
第 8 章 硅纳米加工技术	285
8.1 表面处理技术	285
8.2 纳米转印技术	291
8.3 蚀刻技术	295
8.4 掺杂方法	298
8.5 薄膜淀积技术	302
参考文献	308
第 2 篇 观 测	311
导论 扫描隧道显微镜发明以后	313
第 1 章 扫描隧道显微镜 (STM)	318
1.1 概 述	318
1.2 扫描电容显微镜 (SCM)	322
1.3 原子力显微镜 (AFM)	326
1.4 磁力显微镜	333



1.5 自旋极化扫描探针显微镜	337
1.6 新探针	341
参考文献	344
第2章 用近场光观测	347
2.1 概 述	347
2.2 光纤探针	352
2.3 散射型探针	356
2.4 其他探针	361
2.5 近场显微镜的应用(纳米碳管、DNA 碱基)	364
参考文献	368
第3章 用短脉冲纳米光观测	371
3.1 二次谐波显微镜	371
3.2 双光子显微镜	373
3.3 和频产生(SFG)检测	376
3.4 CARS 显微镜	382
参考文献	385
第4章 用X射线观测	388
4.1 X射线显微镜	388
4.2 光电子能谱	391
4.3 X射线衍射分析	396
4.4 X射线吸收光谱	399
参考文献	405
第5章 用电子、离子观测	407
5.1 扫描电子显微镜	407
5.2 全息照相电子显微镜	410
5.3 超高分辨电子显微镜	413
5.4 透射电子显微镜	418
5.5 低速电子显微镜	422
5.6 俄歇电子能谱	425
5.7 电子衍射法	429
5.8 二次离子质谱仪	433



5.9 中子衍射	437
参考文献	441
第3篇 在IT领域中的应用	447
导论 纳米技术与IT的关系	449
第1章 电子器件	452
1.1 硅器件	452
1.1.1 微细MOS器件	452
1.1.2 新结构MOS器件	455
1.1.3 MRAM	458
1.1.4 新型浮置栅存储器	462
1.1.5 FeRAM(铁电体随机存储器)	466
1.1.6 硅单电子器件	471
1.2 硅材料,LSI材料	475
1.2.1 硅晶体	475
1.2.2 高 k 栅绝缘膜材料、电容器材料	483
1.2.3 ULSI多层布线材料	486
1.3 化合物半导体电子器件	491
1.3.1 HEMT(高电子迁移率晶体管)	491
1.3.2 量子波干涉器件	495
1.3.3 隧道效应器件	499
1.3.4 量子尺寸效应器件	502
参考文献	504
第2章 光子器件	511
2.1 光子晶体	511
2.1.1 光子晶体概论	511
2.1.2 半导体光子晶体	514
2.1.3 二维硅光子晶体	521
2.1.4 干涉法形成光子晶体	524
2.1.5 光子晶体——微粒子集成法	527
2.2 发光元件(激光器)	531
2.2.1 微小球激光器	531

2.2.2 空腔谐振腔结构光源	534
2.2.3 量子阱激光器	538
2.2.4 量子点激光器	542
2.3 光功能元件	545
2.3.1 准相位匹配非线性光学元件	545
2.3.2 光纤光栅	549
2.3.3 亚波长光学元件	552
2.3.4 光放大元件,波长转换元件	555
参考文献	562
第3章 信息存储	569
3.1 纳米磁存储器	569
3.1.1 磁介质	569
3.1.2 磁头及机构	571
3.2 纳米光存储器	575
3.2.1 纳米光介质	575
3.2.2 应用近场光的存储器	579
3.2.3 双光子光异质化存储器	581
3.3 扫描探针存储器	584
参考文献	588
第4章 显示器	592
4.1 纳米碳管显示器	592
4.2 有机 EL 显示器	595
4.3 等离子体显示器面板	600
4.4 LCD	606
参考文献	612
第5章 未来器件	615
5.1 量子通信、量子密码	615
5.2 量子计算元件	618
5.3 SFQ 元件	622
5.4 纳米碳管元件	624
5.5 分子器件	630



5.6 超高灵敏度五感传感器	633
5.7 DNA-分子计算机	636
5.8 利用新碳材料的燃料电池	638
参考文献	641
第4篇 在生物学和化学领域中的应用	645
导论 在生物学和化学领域中的纳米技术应用	647
第1章 利用纳米、微米技术进行生物分子调控(从上至下)	649
1.1 纳米技术同 MEMS 的交汇与融合	649
1.2 生物分子操作	655
1.3 使用硅树脂的微装置	659
1.4 纳米聚合物流体控制器件与系统	662
参考文献	666
第2章 运用分子纳米技术构建生物分子(从下至上)	668
2.1 构建人造 DNA	668
2.2 人工蛋白质的设计与合成	671
2.3 人造细胞体系的构建	675
2.4 脂类纳米管的构建	679
参考文献	683
第3章 在微空间内进行化学分析	686
3.1 微分析芯片	686
3.2 纳米及微米技术与分析测量技术	691
3.3 纳米及微米技术与生物传感器	694
参考文献	702
第4章 在微化学空间内进行化学合成	704
4.1 微空间的化学	704
4.2 微化学合成系统	707
4.3 微型生物反应器	712
4.4 微芯片技术与细胞生物化学实验	714
4.5 微型化学工厂	718
参考文献	722
第5章 蛋白质结构分析	725

5.1 蛋白质的柔性结构	725
5.2 蛋白的结构与力学性质	729
5.3 蛋白质的动态结构	735
5.4 蛋白质的相互作用与其功能的关系	739
参考文献	743
第 6 章 分子马达的功能检测	745
6.1 线性马达的检测	745
6.2 旋转马达的检测	749
6.3 DNA 马达的检测	752
参考文献	756
第 7 章 生物系统的检测	758
7.1 从分子到系统	758
7.2 二维系统、生物膜	762
7.3 单分子与细胞	766
7.4 微空间内的系统	771
参考文献	776
第 8 章 破解遗传信息	778
8.1 纳米芯片技术在基因组研究中的应用	778
8.2 在 DNA 芯片方面的应用	781
8.3 NDA 分子测序	787
8.4 纳米、微芯片技术与后基因组学	791
参考文献	794
第 9 章 纳米技术在生物技术、医疗方面的应用	796
9.1 纳米磁性微粒在生物技术中的应用	796
9.2 纳米机器在医疗方面的应用	799
9.3 纳米技术在组织工程方面的应用	802
9.4 纳米加工与生物技术	807
9.5 人造视网膜	811
9.6 药物运输	817
参考文献	822
索 引	825



纳米技术手册

第1篇

制作

王鸣阳 译

BOOK

本篇执笔者一览

- 相田卓三 (东京大学) 3.2.4,3.4.9
青野正和 (大阪大学) 4.1,4.2
青柳克信 (东京工业大学) 3.1.4
秋叶宇一 (东京工业大学) 4.3
荒井滋久 (东京工业大学) 3.2.3
荒川泰彦 (东京大学) 3.3.1
石原 直 (日本电报电话) 1.2
伊藤治彦 (东京工业大学) 7.2
井上康志 (大阪大学) 7.3
鱼崎浩平 (北海道大学) 3.3.3
宇理须恒雄 (分子科学研究所) 5.4
江刺正喜 (东北大学) 5.2
大川裕司 (物质、材料研究机构) 4.1
大久保达也 (东京大学) 3.4.4
大迫孝志 (冲电气工业) 8.1
大嶋 哲 (产业技术综合研究所) 6.2
大森 整 (理化学研究所) 4.7
冈崎信次 (超先端电子技术开发机构) 5.1.3
冈崎俊也 (名古屋大学) 3.1.1
冈田芳树 (理化学研究所) 3.1.3
荻野俊郎 (横浜国立大学) 4.5
小仓 贤 (东京大学) 3.4.4
小田俊理 (东京工业大学) 3.1.2
落合幸德 (日本电气) 5.1.1
片浦弘道 (东京都立大学) 3.2.1
川合知二 (大阪大学) 1.1
河田 聪 (大阪大学) 5.7.1
神部信幸 (NanoGram Corporation) 6.3
北森武彦 (东京大学) 1.3
邱 建荣 (科学技术振兴事业团) 5.7.2
楠瀬尚史 (大阪大学) 3.4.2
越田信义 (东京农工大学) 3.4.3
古室昌德 (产业技术综合研究所) 8.2
近藤敏启 (茶水女子大学) 3.3.3
筱原久典 (名古屋大学) 3.1.1
庄司 晓 (科学技术振兴事业团) 5.7.1
杉冈幸次 (理化学研究所) 5.7.4
杉山 进 (立命馆大学) 5.3
铃木信三 (东京都立大学) 6.1
关野 徹 (大阪大学) 3.4.2
薛 光洙 (理化学研究所) 3.4.7
高柳邦夫 (东京工业大学) 3.2.2
武内一夫 (理化学研究所) 3.4.7
田岛右副 (理化学研究所) 3.4.7
多田博一 (冈崎国立共同研究机构) 4.4
田中 悟 (北海道大学) 3.1.4
田中修平 (New Glass Forum) 3.4.6
田中秀和 (大阪大学) 1.1
津田明彦 (东京大学) 3.2.4,3.4.9
丰岛义明 (东芝) 8.4
中山忠亲 (大阪大学) 3.4.2
难波 进 (大阪大学) 导论
新原皓一 (大阪大学) 3.4.2
丹羽正昭 (松下电器产业) 8.5
长谷川刚 (物质、材料研究机构) 4.2
马场嘉信 (德岛大学) 1.4
平尾一之 (东京大学) 3.4.6,5.7.2
平山祥郎 (日本电报电话) 2.1
福井孝志 (北海道大学) 5.6
藤田克昌 (大阪大学) 5.7.3
藤田淳一 (日本电气) 7.1
藤平正道 (东京工业大学) 4.3
古屋一仁 (东京工业大学) 2.2,2.3
增本 健 (电磁材料研究所) 3.4.1
松井真二 (姫路工业大学) 5.1.2
宫武 浩 (三菱电机) 8.3
村田和广 (产业技术综合研究所) 5.5
森 勇藏 (大阪大学) 4.6
山内和人 (大阪大学) 4.6
山崎展树 (理化学研究所) 3.3.2
汤村守雄 (产业技术综合研究所) 6.2
和田达夫 (理化学研究所) 3.4.5,3.4.8



超微细加工的历史



1. 纳米加工技术的出现

笔者*不是科学史专家,不知道纳米加工技术始自何时,但开始接触微细加工技术是在1950年。那一年,笔者大学毕业,进入物理和化学研究所工作科,分配到天野铁二先生(擅长制造悬丝静电计)手下工作。我的第一项工作,是制造一台用来测量放射性的静电计,为此,必须要先制作出一根静电计上所使用的直径 $1\mu\text{m}$ 铂线。直径 $1\mu\text{m}$ 铂线被称为沃拉斯顿线(Wollaston Wire),制作方法根据的是金太郎饴提出的原理。先取一根长50mm、直径5mm的银棒,在银棒的轴心打出一条直径为0.5mm的贯通的管孔。这可以使用直径0.5mm的钻头,但是从两端钻孔,每一端都要钻出深达25mm的细孔,对于我来说,也真是一种考验。把一根直径0.5mm的铂线穿入从两端打通的管孔,利用金刚石拉丝模具拉伸穿有铂线的银棒,渐次缩小银棒的孔径,最后使其外径变为0.5mm(原来棒径的1/10)。材料在拉伸过程中会变硬而脆,不时需要通以电流进行退火。拉伸后的线丝总长度变成了5m,此时在外径为0.5mm的银线的轴心内就有了一根直径 $50\mu\text{m}$ 的铂线。把这根包裹着铂线的银线再穿入另一根外径为5mm的银棒的直径0.5mm轴心孔道内,重复以上操作,就能够得到其外径仅有原来1/100的包裹着铂线的银线。处理直径 $100\sim 50\mu\text{m}$ 线丝(头发

粗细)不算太难,最终,我们就可以得到包裹在外径为 $50\mu\text{m}$ 的银线轴心内的一根直径为 $0.5\mu\text{m}$ 的铂线。笔者采用这种方法制出过数百米的沃拉斯顿线,并且把直径 $1\sim 0.5\mu\text{m}$ 的铂线用于制造静电计。按理说,使用这种方法是有可能进一步制造出直径为纳米量级的铂线的,不过,我没有听说有谁这样试过。

笔者在大学讲课,就是从介绍沃拉斯顿线开始的……

问:“怎样才能取出包裹在直径 $100\mu\text{m}$ 银线轴心内的那根直径 $1\mu\text{m}$ 铂线?”

学生:“可以用硝酸溶解掉外面的金属。”

再问:“怎样才能找到浸没在硝酸溶液里的铂线,并把它取出来?”

一时间,没有学生能够回答。答案其实很简单,那是业内人士早就知道的一种方法。截取一段待用的沃拉斯顿线(一般长度为 $15\sim 20\text{cm}$),先把其两端各自插入硝酸溶液 $1\sim 2\text{mm}$,溶解掉外面的金属。然后,在线丝的两端蘸上一点蜡,再把整根线丝投入硝酸溶液中。因为蜡很轻,而且在酸溶液中不溶解,这样一来,在直径 $1\mu\text{m}$ 铂线的两端就会各自连着一个明显可见的蜡丸,漂浮在溶液表面。那样细的铂线当然是看不见的,通过这种办法则可以用镊子夹出蜡丸,而且蜡丸的重量还会把直径

* 本手册的主编难波进。——译者注。

1 μm 铂线向下牵拉,使之保持为悬垂状。把铂线在水中洗干净,用镊子把它张挂在静电计的两个电极之间,调整妥当,它就构成了测量放射性所使用的静电计的传感部件。蜡丸很轻,不用担心它们的重量会拉断直径 1 μm 的铂细线。张挂那样细的铂线有些费事,需要安装两个利用直径大约 10 μm 的水晶丝制成的小弹簧。关于那项复杂技术,就不可能在这里介绍了。

W. H. Wollaston^[1] (1766~1828 年) 是英国的化学家兼物理学家。他于 1802 年在太阳光谱中发现了暗线,在研究铂的过程中,于 1803 年发现了元素钡,接着在 1804 年又发现元素铯,并在 1805 年发明了利用粉末来制造具有可锻造特性的金属铂的方法。他因为在 1810 年发现了第一种氨基酸胱氨酸而成为声名卓著的学者。不仅如此,在光学领域,他还发明了著名的沃拉斯顿棱镜以及由两块透镜组合而成的能够消除像差的沃拉斯顿复合透镜,等等。根据 J. Strong^[2] 书中的描述,“沃拉斯顿的方法,是用一根银管紧包住铂线,待使用金刚石拉丝模具把这根复合管拉伸以后,再把它投入硝酸溶液中溶解掉外面的银,于是便得到直径为 1/2 μm 的非常细的铂线。在当时,沃拉斯顿线被当作保护精密仪器 (Delicate instrument) 的熔断器,曾经得到广泛使用。”

这里还可以引用小山庆太所著《法拉第》^[3] 一书中关于沃拉斯顿的一段话:“沃拉斯顿出身于英国诺福克郡的一个牧师家庭。他在剑桥攻读医学,成为一名开业医生。自 1800 年起,他不再行医,移居至伦敦,在那里一心一意从事化学和物理学领域的研究工作。起初,他探索铂的加工方法。由于他的工作,在那以前几乎毫无实用价值的铂便被广泛用作许多实验装置的材料。沃拉斯顿也因此而致富,这使他得

以在后半生专心致志埋头于科学研究(直到逝世,他也没有公开他的铂加工方法。”)。受到奥斯特发现电流能够导致磁体晃动那种现象的启发,他还向朋友戴维(法拉第的恩师)谈过自己的一个想法,即让放在磁体周围的导线通过电流,也有可能使该导线旋转。当时进行的实验虽然失败了,但是,法拉第在获知沃拉斯顿的想法以后,在其后他自己所进行的天才实验中,终于成功地实现了电磁旋转。

作为纳米尺度材料的应用,自古就有在玻璃中掺杂金属微粒来获得彩色玻璃的工艺,而厚度仅有数十纳米的金箔更是广泛使用在许多场合。不过,它们究竟是何人在什么时间发明的,现在已经无从考证。

目前,纳米碳管作为一种纳米材料方兴未艾。根据以上介绍,我们似乎可以说,纳米加工技术实际上是始于 200 年前的沃拉斯顿。他当时为了技术上的需要不仅已经能够成功加工出小于 1 μm 的制品,即沃拉斯顿线,而且也已经把它们应用于实际中。

2. 初识纳米加工技术

笔者曾经在 1958 年前后进行过电子束蒸发镀膜装置的研制工作,为此查阅过有关电子束加热的所有文献。大约在 1959 年,我查到一篇由德国蔡司 (Carl Zeiss) 公司发表的关于利用电子束进行微细加工的论文。那是一篇介绍如何制造用于形成合成纤维的可以改变形状的喷丝头的文章。德国同日本一样也是战败国,但是日本在自主技术上与之存在的差距之大,令人吃惊,同时,这也使我对电子束微细加工技术的重要性产生了很深的印象。我知道,仅靠一家的力量进行试制工作是很困难的,于是召开了一个关于带电粒子束在工业上应用的讨论会。与此同时,由大阪大学的菅田荣治教授牵头,在 1959 年还成立了一

个“带电粒子束研究会”。在由物理和化学研究所主办,于1959年11月19日召开的第1次讨论会的邀请函上,有这样两段话,引述如下:

“实现对真空中电子束的控制是发展电子技术的基础,最近,电子束技术又获得了巨大的推力,即将踏入工业实用的阶段。这就是说,电子束已经有可能被应用于金属的熔炼、焊接和超微细加工等许多方面。

国外在这方面已经有了相当深入的研究,并进入了实用化阶段,而在日本,则还是一片空白。把带电粒子束应用于工业,是一项重大的技术课题,尚需一段发展时间。在日本,很需要大力促进这方面的研究工作。因此,物理和化学研究所半导体研究室发起召开第一次讨论会,敬请光临为荷。”

以那次讨论会为契机,除电子显微镜外,其他关于带电粒子束的工业应用研究也开始活跃起来。1960年,文部省的一项综合性研究项目“带电粒子束的工业应用研究”启动,在它的带动下,日本学术振兴会的第132委员会(起初由菅田荣治担任代委员长)从1962年4月1日起开始活动,并一直持续至今。1960年,“电子束微细加工设备的试制”课题被列入通产省矿业补助金的重点资助项目,那是一项包括计划、控制、评价在内的历时3年的研究计划,预算经费为每年2000万日元。当时,笔者作为物理和化学研究所参加到菅田理研工作科的成员,独自承担那项任务,在理研工作科和JEOL等部门的协助下,经过一年时间,成功研制出如图1^[4]所示的电子束微细加工设备(最大加速电压50 kV,最大束电流3 mA)。那是笔者首次同工业界合作进行研究,该设备也是日本的第一台电子束微细加工装置。

笔者首次接触纳米加工技术是在1961

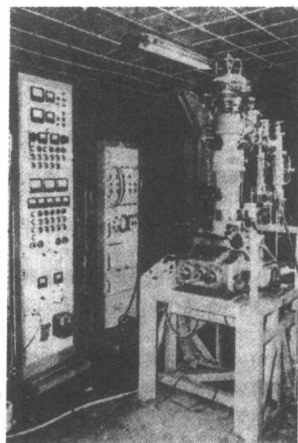
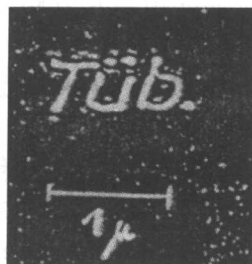
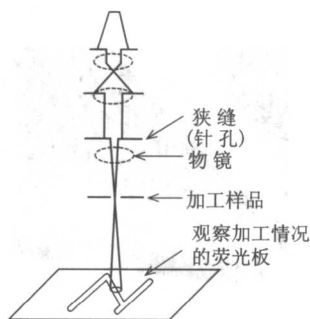


图1 电子束微细加工设备

年,那时看到了Tübingen大学Möllenstedt教授的一篇论文^[5]。Möllenstedt的工作,如图2(a)所示,是用电子显微镜在一块硝棉胶膜片上写出大小仅有数十纳米的文字。图2(b)给出了他的加工方法的示意图。



(a) 亚微米尺度的文字



(b) 加工方法

图2 用电子束进行超微细加工