

JIXIAN ZHIZAO

学术前沿研究

极限制造

高治军 许可 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

极 限 制 造

高治军 许 可 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以典型纳米器件——单壁碳纳米管场效应晶体管(SWCNT Field Effect Transistor, SWCNT FET)装配制造为范例,面向纳米器件规模化制造,针对 SWCNT FET 规模化制造市场需求,系统研究了基于浮动电势和介电泳原理的纳米器件装配方法,设计实现了基于浮动电势介电泳的纳米器件批量化装配技术,实验结果验证了研究方法的有效性和可行性,为纳米电子器件制造技术发展提供了有意义的理论指导和实验方法。

图书在版编目(CIP)数据

极限制造/高治军,许可著. —徐州:中国矿业大学出

版社, 2018.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3950 - 1

I. ①极… II. ①高…②许… III. ①纳米材料—电子器件—
生产工艺 IV. ①TN605

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 081581 号

书 名 极限制造

著 者 高治军 许 可

责任编辑 仓小金

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 8.5 字数 162 千字

版次/印次 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

当尺度由宏观缩小到微观时,将出现很多新奇的物理现象,很多物理规律也将发生质的改变。目前,针对纳米精度制造、纳米尺度制造的基础科学问题,研究制造过程由宏观进入微观时,能量、运动与物质结构和性能间的作用机理与转换规律,结合材料科学和介观物理学,综合采用控制理论和纳米操作机器人技术,发展基于纳米力反馈的可控纳米加工技术,旨在实现面向碳纳米管、石墨烯、ZnO 纳米线等一维、二维纳米材料的可重复、高精度、一致性加工。在纳米加工技术领域,随着实验技术水平的不断提高,研究人员已获得了纳米加工过程的许多重要信息,向理论研究提出了更具挑战性的课题。随着对纳米加工过程的深入研究,如何从静态的理论研究向动态发展,如从小体系向纳米、介观尺度过渡,已经成为目前纳米技术理论研究的热点。

纳米材料指其结构单元的尺寸介于 $1\sim 100\text{ nm}$ 的材料,在结构上分为零维、一维、二维。自从 1993 年单壁碳纳米管(Single-Walled Carbon Nanotube, SWCNT)实现人工合成以来,研究人员已发现它具有多种特殊的物理特性,如导体或半导体、量子特性、纳米尺度等,为纳电子器件提供了非常理想的新材料。SWCNT 所具有的独特电特性及尺度特性,使它成为研制新型电子单元器件的首选材料。因此,构建 SWCNT 纳电子器件的技术研究已成为国际科学技术前沿热点之一。基于 SWCNT 的纳米器件制造核心技术是材料制备、装

配与可靠连接等。随着纳米科学技术的进步,实现纳米器件的规模化制造装配已成为纳米科学技术研究与应用发展的关注热点。

目前,SWCNTs基纳米器件制作技术基本上仍处于实验室阶段,现有典型装配技术还无法实现可规模化、低成本的纳米器件制造,这种技术现状仍然是制约纳电子器件研究和应用所面临的挑战性问题。

本书以典型纳米器件——单壁碳纳米管场效应晶体管(SWCNT Field Effect Transistor, SWCNT FET)装配制造为范例,面向纳米器件规模化制造,针对SWCNT FET规模化制造市场需求,系统研究了基于浮动电势和介电泳原理的纳米器件装配方法,设计实现了基于浮动电势介电泳的纳米器件批量化装配技术,实验结果验证了研究方法的有效性和可行性,为纳米电子器件制造技术发展提供了有意义的理论指导和实验方法。

本书第1、4、6、7、8章由沈阳建筑大学的高治军撰写;其余各章由沈阳建筑大学的许可教授撰写。全书由高治军完成定稿和校对。

值此书付诸印刷之际,首先感谢沈阳建筑大学刘剑、李孟歆、英宇、侯静、梁文峰、张颖、郭喜峰、胡楠、许崇、王鑫、付国江等同志为此书的撰写投入大量精力;其次,感谢沈阳建筑大学王新、李宏伟、门蕊、刘新、李凌燕、刘西洋、王丽、杨谢柳、毛永明、常岭等同志提供的宝贵意见,同时感谢我的研究生富楚涵、孙伟航、邵永健(第1章)、解树森(第2章)、黄鑫(第3章)和陈巨擘(第4章)等参与了本书的编写工作。

由于著者水平所限,书中难免有不足之处,欢迎读者和有识之士批评指正。

著者

二〇一八年三月二十日

目 录

第 1 章 纳米器件装配制造技术	1
1.1 概述	1
1.2 纳电子器件装配制造研究现状	5
1.3 机器人化纳米操作系统研究现状	9
1.4 纳米器件装配制造主要问题	12
1.5 纳米器件的规模化装配制造关键技术	14
1.6 机器人化纳米操作系统的结构、主要问题与关键技术	15
第 2 章 纳米材料预处理方法研究	19
2.1 单壁碳纳米管结构和性质	19
2.2 单壁碳纳米管束的分散方法研究	29
2.3 单壁碳纳米管密度离心纯化方法研究	36
2.4 单壁碳纳米管预处理实验研究	37
第 3 章 基于介电泳原理的 SWCNT 装配方法研究	40
3.1 介电泳电场的工作原理	40
第 4 章 碳纳米管器件的装配制造研究	54
4.1 引言	54
4.2 单壁碳纳米管纳米器件的装配制造实验研究	55
4.3 单壁碳纳米管纳米器件的批量化装配实验研究	66

第 5 章 碳纳米管气体传感器制作及特性测试研究	73
5.1 引言	73
5.2 基于纳米材料的气体传感器实验平台搭建	74
5.3 纳电子器件测试技术	76
5.4 基于单壁碳纳米管气体传感器的气敏特性检测	77
第 6 章 纳米传感器的介电泳组装实验研究	83
6.1 引言	83
6.2 金纳米粒子的介电泳组装实验研究	83
6.3 金纳米粒子传感单元对气体流量的检测	89
6.4 碳纳米管的介电泳组装实验研究	92
6.5 碳纳米管对次氯酸钠的检测实验	94
第 7 章 机器人化纳米操作系统驱动与定位研究	100
7.1 压电陶瓷驱动器电压-位移非线性分析与驱动方法	102
7.2 三维纳米力反馈与控制实验	106
第 8 章 基于混合纳米材料电子鼻制造研究	111
8.1 基于实时反馈的纳电子器件规模化实验平台搭建	112
8.2 基于实时反馈的纳电子器件规模化实验	113
参考文献	118

第 1 章 纳米器件装配制造技术

1.1 概 述

纳米技术和纳米器件是当今高新技术的重要发展方向之一。纳米技术的突破和纳米器件的应用依赖于纳米加工技术的进步。根据国际半导体发展蓝图(International Technology Roadmap for Semiconductor, ITRS)2007 年 12 月的技术报告(ITRS2007),到 2020 年,动态随机存储器的半节距宽度将为 14 nm。随着器件尺寸的不断减小,将越来越接近现有电子元器件架构的极限,所遇到的难以逾越的问题不仅是电子器件的物理极限,同时还包括功耗问题以及精密图形化加工等技术瓶颈。为了应对“后摩尔时代”的到来,半导体和集成电路在近几年前就提出了“甚摩尔”概念,其目的就是要利用先进的微纳米器件加工技术,将信息获取、处理、发送和接收单元集成在同一芯片上,以提高芯片功能密度,来应对所面临的技术瓶颈。传统的硅基平面印刷工艺技术已经制约了集成电路(Integrated Circuit, IC)芯片性能和集成度的进一步提升,发展新型阵列化和规模化的纳电子器件装配与制造技术已成为目前国际科技界最为重视的前沿研究领域。纳米加工技术和相关设备的研发水平,直接反映了一个国家和地区在先进制造科技领域的总体发展实力,这一点已成为世界性共识。纳电子器件规模化装配制造能力的提升,将对众多领域技术的提升和推动作用产生巨大的影响。

随着纳米技术的进步,纳米传感器已经被广泛应用于各种领域,典型如气体、温度、湿度监测等。随着材料科学和传感技术的发展,基于模式识别方法的电子鼻技术吸引越来越多的关注。电子鼻是能够模拟人类嗅觉系统的一种人工智能电子器件,是适用于多种条件下测量一种或多种气味物质的气体敏感系统。电子鼻系统主要由气体传感器阵列、信号预处理单元和模式识别单元三部分组成。不同纳米材料吸附同一气体时,因各自的宽带隙不同,吸附前后导电变化率也就不同,所以气体传感器阵列可以由多种纳米材料作为其活性材料,与电子鼻传统活性材料相比,纳米材料所具有的独特电学特性及尺度特性,能大大提高对目标气体检测的准确性和快速性。

对基于一维纳米材料的纳电子器件或系统而言,如同三极管在微电子学中的重要意义一样,基于纳米材料的场效应晶体管(Field Effect Transistor, FET)作为最基本的功能构成单元,具有极其重要的地位。目前面临的问题是,利用实验室方法制造的纳米材料结构效率很低,可靠性差,成本高,远不能满足纳米科学技术发展的需求和实际应用需求,这种现状,极大限制了基于纳米材料 FET 结构的纳米尺度材料、物理、化学、生物学特性研究以及纳米器件、功能结构、系统研究的开展,同时,也极大限制了纳米应用技术的研究发展。

基于氧化锌、碳纳米管、氧化铜等纳米材料的纳米功能结构和功能器件及其制作技术已成为新的科学技术发展领域。单壁碳纳米管(Single-Walled Carbon Nanotube, SWCNT)所具有的独特电学特性及尺度特性,使它成为研制下一代电子单元器件的首选,单壁碳纳米管不仅是微电子器件中硅基材料的绝佳替代品,而且能大大提高许多功能器件的物理化学性质。因此构建碳纳米管器件的技术研究已成为国际科学技术前沿热点之一。通过纳米装配技术进行纳米器件的制造,是纳米制造的基本技术,其核心内容是实现对纳米材料的精确操控。而目前对于纳米材料的有效分离、操作、加工、装配等操控与检测技术仍是亟待解决的难题。氧化锌(Zinc oxide, ZnO)作为一

种重要的宽禁带半导体功能材料,具有宽带隙(3.37 eV)和高激子束缚能(60 meV),可实现室温下的紫外线受激辐射,具备半导体、光电、压电、热电、气敏、透明导电和无害性等诸多优良特性,是一种重要的纳米功能材料。近年来,随着高质量 ZnO 晶体生长技术的突破, ZnO 材料、器件及应用研究已成为新的持续研究热点。一维纳米材料和器件的研究作为纳米科学技术的一个重要分支,自 1991 年 S. Iijima 发现多壁碳纳米管起,便得到了极大的关注和发展。ZnO 纳米线、纳米棒是重要的一维纳米材料,可用于制造紫外发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)、激光器二极管(Laser Diode, LD)、光电探测器(Photo-detector, PD)等重要光电器件,也可用于 ZnO 基气体、生物、化学传感器,在光电子学太阳能电池、逻辑电路以及自旋电子器件等纳米电子学领域也具有广阔的应用前景;单壁碳纳米管所具有的独特电学特性及尺度特性,使它成为研制下一代电子单元器件的首选。单壁碳纳米管不仅是微电子器件中硅基材料的绝佳替代品,而且能大大提高许多功能器件的物理化学性质。因此构建碳纳米管器件的技术研究已成为国际科学技术前沿热点之一。通过纳米装配技术进行纳米器件的制造,是纳米制造的基本技术,其核心内容是实现纳米材料的精确操控。而目前对于纳米材料的有效分离、操作、加工、装配等操控与检测技术仍是亟待解决的难题。

例如,在采用纳米结构作为敏感元件构造电学传感器时,通常需要将作为传感材料的纳米结构排布或跨接在两电极之间,以便利利用其特性将随测量对象的变化以电信号的形式传出,所以有选择地将纳米材料安放到指定的位置,是纳米材料应用中首先要解决的问题。对基于 SWCNT 的纳电子器件或系统而言,如同三极管在微电子学中的重要意义一样, SWCNT FET 作为最基本的功能构成单元,具有极其重要的地位。SWCNT FET 是利用 SWCNT 的半导体特性将其作为半导体导电通道,两个铂电极分别作为源极和漏极,硅基底作为栅极,通过电连接与封装构成 SWCNT FET 纳米电子器件,如图 1-1

所示。目前面临的问题是,利用实验室方法制造 SWCNT FET 结构效率很低,可靠性差,成本高,远不能满足纳米科学技术发展的需求和实际应用需求,这种现状。极大限制了基于 SWCNT FET 结构的纳米尺度材料、物理、化学、生物学特性研究,极大限制了纳米器件、功能结构、系统研究的开展,同时,也极大限制了纳米应用技术的研究发展。

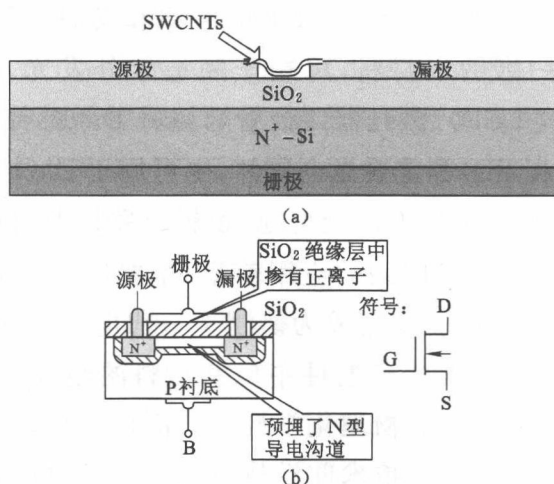


图 1-1 场效应晶体管结构图

(a) SWCNT FET 结构图; (b) 硅基 FET 结构图

纳米尺度下的物质普遍具有介电特性,可以在极化条件下为介电泳力所驱动,因而基于介电泳(Dielectrophoresis, DEP)原理的非接触式驱动控制方法为纳米材料的自动化、规模化操控与装配提供了一种可行技术途径。特别是介电泳技术适用于批量的纳米材料操作与控制。因此研究有效批量操控纳米材料,实现纳米材料的分离、筛选、装配技术和理论方法,已成为当前纳米科学技术研究领域的前沿热点之一。另外,这种方法与技术还可以应用到氧化锌、氧化石墨烯等其他零维、一维、二维纳米材料上,从而可以用于进行各种微纳电子器件的大规模装配与制造。

SWCNT FET、ZnO FET、CuO FET 是利用它们的半导体特性将其作为半导体导电通道,两个铂电极分别作为源极和漏极,硅基底作为栅极,通过电连接与封装构成 FET 纳米电子器件。目前面临的问题是,利用实验室方法制造基于纳米材料的 FET 结构效率很低,可靠性差,成本高,远不能满足纳米科学技术发展的需求和实际应用需求,这种现状极大限制了基于纳米材料 FET 结构的纳米尺度材料、物理、化学、生物学特性研究以及纳米器件、功能结构、系统研究的开展,同时,也极大限制了纳米应用技术的研究发展。目前,纳米器件制作技术基本上仍处于实验室研究阶段,现有装配制造技术还无法具有实时反馈的规模化、低成本制造仍然是制约纳米器件研究和应用所面临的挑战性问题。

1.2 纳电子器件装配制造研究现状

过去半个多世纪的历史表明,电子器件和计算机技术的发展对人类社会进步起到了巨大的推动作用,微电子器件被广泛应用于人类社会各个领域。然而广泛认可的摩尔定律“IC 技术可以使商业芯片的晶体管集成度每 2 到 3 年翻一番”的推论目前已经达到极限,微电子器件的光刻加工技术、电子行为和功耗过大是当前微电子技术进一步发展的三大限制。纳米结构可能是突破微电子技术限制构筑新一代电子器件的重要途径。

在采用纳米结构作为敏感元件构造电学传感器时,通常需要将作为传感材料的纳米结构排布或跨接在两电极之间,以便利用将其特性随测量对象的变化以电信号的形式传出,所以有选择地将纳米材料安放到指定的位置,是纳米材料应用中首先要解决的问题。ZnO 纳米线传感器的工作原理与场效应晶体管相似,在硅基底上,采用各种方法将 ZnO 与微电极相连,利用半导体性 ZnO 纳米线作为其导电通道,两微电极分别作为源极和漏极,硅基底背面沉积金属层作为栅

极,从而形成 ZnO FET。通过 ZnO 纳米线吸附在纳米线表面的特定目标气体、化学、生物分子引起纳米线内载流子的耗尽或者积累,从而达到调控沟道电流的作用。根据纳米线导电性能的变化,实现准确辨别所吸附物质分子的目的。与常规体材料传感器相比,由于 ZnO 一维纳米线材料的细微化,比表面积增加,拥有体材料所不具备的表面效应和量子效应,晶体质量更好,载流子运输性能更为优越,因此,ZnO 纳米线传感器具有高灵敏度、高选择性、高响应速度、小体积、低能耗等优点。随着高质量 ZnO 晶体生长技术的突破,掀起了一场关于 ZnO 的研究热潮。已利用多种方法生长出包括薄膜、纳米带、纳米线、纳米棒、纳米环在内的 ZnO 材料,并且研制出相应的 ZnO 器件,展示了其良好的器件性能及应用前景。目前,美国、欧洲、日本、韩国等国家和地区均有若干研究机构开展了 ZnO 一维纳米器件的相关研究。在近八年的学术报道中,ZnO FET 及传感器研究占据了相当大的比例。普渡大学报道了使用自组装有机物作为绝缘栅介质,研究了应力对 ZnO FET 性能的影响,并且制备了增强型和耗尽型 ZnO FET。剑桥大学报道了跨导为 $3.06 \mu\text{S}$ 、迁移率为 $450 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 的高性能 ZnO FET。加利福尼亚大学也报道了 ZnO FET、气体传感器以及可恢复 ZnO 纳米线化学传感器。近年来,基于纳米材料的电子鼻制造相继展开。2013 年,韩国浦项工科大学 W. Ko 等利用 ZnO 纳米线作为活性材料制作成电子鼻对酒精、甲苯进行了检测,获得了比传统电子鼻更快的响应时间和更高的准确率。2013 年,荷兰阿姆斯特丹大学 S. Dragonieri 等采用纳米电子鼻对 56 名疑似肺结核患者呼出的气体进行识别诊断,其中 31 名被确诊,与最终结果完全相符。2014 年,意大利布雷西亚大学 G. Sberveglieri 等人制成了 SnO_2 纳米线电子鼻,对酒精和水蒸气进行了识别,并应用于食品储藏监测,取得了良好效果。2013 年,美国匹兹堡大学 Y. S. Hu 等采用基于单根 ZnO 纳米线的电子鼻从混合气体中快速检测出 CO 、 NO_2 、 CH_3OH 、 H_2 四种气体,具有很好的可重复性和操作性。2014 年,泰

国农业大学 C. Wongchoosuk 等利用气相法和原子层沉积相结合的技术,获得了大规模高度同质化的基于 ZnO 表面改性材料的微电子鼻,可对特定的氧化物表面进行紫外线照射,光激氧自由基可以在室温条件下与核壳纳米线反应并主导气体传感机制,能够有效区分 ppb 级浓度的有毒气体和无毒气体。国内在 ZnO 纳米线材料的生长、光电应用等方面有较深入的研究,在小规模化 ZnO FET 器件的装配制造方面也开展较好,基于闭环实时检测操控系统的自动化、规模化的纳电子器件制造还很少涉及;基于纳米材料的电子鼻技术已受到一些国内高校和科研院所的关注,而基于多种纳米材料混合的电子鼻相关研究还仍然较少。2009 年,著者运用水热法合成 ZnO 纳米线,开展了基于自下而上的纳米器件设计和制作方法研究,成功研制出具有紫外辐照敏感特性的 ZnO FET。近期开展了基于浮动电势的规模化 SWCNT 基纳米器件的装配方法研究。在纳米操控方面,2013 年,著者开发了一套基于闭环实时操控系统的微流控和光诱导方法,实现了图形化聚乙二醇双丙烯酸酯水凝胶的快速原位固化并用于控制细胞生长行为的技术。2012 年,著者开发了一套高速自动化细胞机械及电特性测量系统,配合程序化控制的运动载物平台,可以高速自动化完成大范围区域内细胞机械及电特性的规模化测量。

目前,有效装配纳米材料的方法主要有自组装技术、AFM 操作、定向生长技术、光镊及介电泳法。自组装技术是指纳米材料在平衡条件下,通过弱相互作用自发地缔结成热力学上稳定的、结构上确定的、性能上特殊的聚集体的过程。自组装过程中,操作自动进行到给定预期值,不受外力影响,尽管自组装技术能实现纳米尺度下物体形貌的改变,但不能对单个纳米物体进行操控,且不能解决在运行时出现的任意纳米结构的问题;AFM 操作方法能利用其微悬臂感知和检测探针与被操作样品原子间的作用力,从而实现原子的搬运、重新排列及刻划等操作。AFM 操作方法虽然能够对纳米材料进行操控,但工作范围小,只能对接近目标位置的纳米材料进行简单的推、拉、刻、

划等操作,并且每次工作只能应对一个操作对象,所以只能停留在实验室中操作;定向生长技术是在微电极上直接定向生长所需的纳米材料,这个过程是可控的,但是会带来催化剂污染问题,而且能用定向生长法控制的纳米材料的种类也不能被期望;光镊技术用一束高度汇聚的激光形成的三维势阱来俘获、操作控制微小粒子,可操控微小宏观物体,在生命科学领域有一定的应用,但较难同时操控多个粒子或者对单一粒子进行复杂操控。

1998年,荷兰 Delft 工业大学 C. Dekker 等人将半导体型碳纳米管与金属电极相连,通过改变基底的电压(门电压)研制出常温状态下的碳纳米管场效应晶体管;2001年,Delft 工业大学利用原子力显微镜(Atomic Force Microscopy, AFM)探针操作固定在微电极两端的金属性碳纳米管,改变被操作部分的导电性,利用碳纳米管场效应晶体管组装出简单门电路;2006年,美国 IBM 公司把单根单壁碳纳米管当成导线,研制成功由 P 型结和 N 型结组成的反相器,这些研究成果证实了制造基于碳纳米管的纳电子逻辑器件的可能性;美国密西根州立大学 N. Xi 课题组自制了 SWCNT 溶液自动滴定系统,通过光学显微镜能看到 SWCNT 溶液介电泳驱动装配过程,使制造 SWCNT FET 纳米器件的准确性、可靠性、快速性得到较好的提高。2009年,加拿大国家科学院 B. Aissa 等研究者通过激光合成法获得的 SWCNT,直接生长搭配在电极的源漏极间,制成了高开关比的 SWCNT FET。美国佐治亚理工大学的 P. Poncharal 等对碳纳米管(Carbon Nanotube, CNT)振动进行研究时,发现当有微小质量附加在碳纳米管上时,纳米管共振频率会发生改变,根据频率的改变可以测量该物体的质量(测得病毒分子的质量是 22 fg),研制了碳纳米管质量检测器(能测定皮克~飞克的质量)。印度科学研究所的 S. Ghosh 等研究了当流体流过碳纳米管管束时,在碳纳米管上沿着流动方向会产生电压,电压的大小与流动速度有关,研制了响应迅速(1 ms 内)且灵敏度极高的微流量传感器。韩国三星公司的 D. S. Chung

等利用碳纳米管的场发射效应,研制成功了 4.5 inch 的 CNT 场发射平板显示器。

1.3 机器人化纳米操作系统研究现状

目前,研究人员应用扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope, STM)或原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)进行纳米尺度的操作,但是,这种操作只能离线规划探针的运动轨迹,在操作过程中缺乏探针与纳米物体相互作用的反馈信息,操作者无法实时得知探针在操作过程中对纳米物体作用与否及其作用的效果,从而无法对操作的中间过程以及最终的操作结果进行精确控制,导致纳米操作的成功率、效率很低。

针对这些问题,为实现纳米操作过程实时信息的反馈,并借助反馈信息对操作进行实时调节与控制,20 世纪 90 年代后期有学者开始将机器人技术(如实时信息反馈、主从式操作技术等)引入纳米操作中,从而诞生了一种全新的机器人化纳米操作概念,机器人化纳米操作方法与系统实现技术取得了一定的进展。目前,机器人化纳米操作系统主要分两类:一类是在扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)的真空室中加装纳米操作器,从而形成仅具有视觉反馈的机器人化纳米操作系统;另一类为具有部分反馈信息的 AFM 机器人化纳米操作系统。

1.3.1 基于 SEM 的机器人化纳米操作系统

SEM 成像原理为:利用聚焦电子束在样品表面进行光栅式扫描,将产生的二次电子用探测器收集,经处理形成电信号后再经显像管在荧光屏上显示,从而得到样品表面的形貌。通过在 SEM 的真空室内加装纳米操作器,可以在 SEM 成像监视下进行纳米操作,是一种具有视觉反馈的机器人化纳米操作方式。

1998 年, Nogoya 大学的 Fukuda 实验室在 SEM 真空室中加装了一个多自由度的纳米操作装置, 构建了基于 SEM 的纳米操作系统, 并对多壁碳纳米管(multi-wall carbon nanotube, MWCNT)进行了操作研究。虽然利用 SEM 可以获得实时视觉反馈信息, 但 SEM 存在自身的缺点: 一方面其成像分辨率不如 SPM, 操作精度受到一定限制, 且由于非导体成像时其表面一般需要镀金, 使得对于非导体材料的表面操作很难进行。另一方面, 它在生物方面的应用受到很大限制, 原因为: ① 生物活体物质一般存在于液体中, 而 SEM 无法对液态对象成像; ② 虽然部分生物样本可以经干燥处理后固定于基片上, 但容易失去活性, 而且 SEM 的高能电子束很容易造成生物样本的破坏。另外, 由于在操作过程中缺乏一类重要信息: (三维)力/触觉反馈信息, 操作者无法依靠力/触觉反馈信息来辅助精确操作或装配, 操作过程中很容易造成末端执行器(如微探针)或微粒因受力过大而损坏。上述缺陷很大程度地影响了基于 SEM 的纳米操作系统的发展与应用。

1.3.2 基于 AFM 的机器人化纳米操作系统

借鉴机器人技术, 南加州大学的 A. A. Requicha 等基于 CP 型 AFM 进行了二次开发, 通过鼠标控制探针的运动轨迹, 在操作过程中关闭 Z 向反馈, 通过监测操作过程中探针悬臂的 Z 向变形等信息来判断操作的进展情况, 进行纳米微粒的操作实验。

采用上述系统可以在相对平坦的基片表面实现一些操作任务, 但由于在上述操作过程中关闭 Z 向反馈, 操作者对探针的 Z 向运动无法控制, 当基片表面高低差距较大时, 探针容易撞上基片而造成探针或基片的损坏; 另外, 仅根据悬臂的单向变形(Z 向变形)无法准确区分探针操作的是微粒还是基底上的突起处, 从而无法实时判断操作过程的进展情况, 也就无法对操作的中间过程及最终的操作结果进行实时反馈控制, 显然这种操作方式的效率及成功率、灵活性仍然