

NEMS传感器的研制与应用

Preparation of NEMS Sensor and Its Application



谭苗苗 著



冶金工业出版社

www.cnmp.com.cn

NEMS 传感器的研制与应用

谭苗苗 著

北 京

冶金工业出版社

2017

内 容 提 要

本书概述了 NEMS 传感器的结构类型、加工工艺类型和常用的测试方案,并对目前国内外 NEMS 传感器研究取得的研究成果和发展现状进行了总结分析;针对 NEMS 传感器比较常见的场效应晶体管结构,详细阐述了两不同的—维纳米结构组装 NEMS 器件的工艺方法,以及器件电路结构加工工艺等;并将硅纳米线场效应晶体管结构的传感器应用于空气生物气溶胶的在线检测;对 NEMS 传感器未来的发展方向进行了展望。本书可供相关科研单位技术人员和大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

NEMS 传感器的研制与应用/谭苗苗著. —北京:冶金工业出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5024-7442-3

I. ①N… II. ①谭… III. ①机电系统—传感器—研究
IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 012648 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp. com. cn

责任编辑 姜晓辉 美术编辑 杨 帆 版式设计 杨 帆

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7442-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2017 年 1 月第 1 版, 2017 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 7.5 印张; 181 千字; 109 页

28.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)



前 言

纳米机电系统 (NEMS) 是随着微机电系统 (MEMS) 和纳米技术的进步而发展起来的。由于纳米尺度带来的纳米效应, NEMS 传感器有望突破传统器件的性能极限, 近年来受到国内外研究者的广泛关注。NEMS 器件目前大都处于实验室研究阶段, 少有成熟的 NEMS 产品应用于实际检测对象。将 NEMS 器件的先进研究成果进行成功转化已迫在眉睫。NEMS 器件相关技术研究比较前沿, 且涉及学科领域面广。作者结合自己在攻读博士学位和博士后流动站工作期间, 以及近几年工作中 NEMS 传感器的研究及创新型成果, 将 NEMS 传感器从设计、加工、测试到最终应用于实际检测环境的整个过程涉及到的关键技术进行了介绍。

本书主要包括七个部分: NEMS 传感器的结构及加工工艺设计, 基于一维纳米材料的 NEMS 传感器研究进展, 面向 NEMS 传感器的一维纳米结构流体组装, 面向 NEMS 传感器的一维纳米结构介电电泳组装, 面向 NEMS 传感器的电接触性能研究、NEMS 传感器在空气环境检测中的应用、NEMS 传感器的发展趋势及应用前景展望。

本书的出版由北京联合大学学术著作出版基金资助。

谭苗苗

2016 年 9 月 27 日于北京联合大学

目 录

1 NEMS 传感器的结构及加工工艺设计	1
1.1 NEMS 传感器的敏感元件：一维纳米材料	1
1.1.1 纳米管、纳米线、纳米带	1
1.1.1.1 碳纳米管	1
1.1.1.2 纳米线	2
1.1.1.3 纳米带	2
1.1.2 一维纳米材料的机电性能	2
1.2 基于一维纳米材料的 NEMS 生物传感器设计	3
1.2.1 NEMS 传感器系统设计	3
1.2.2 传感器加工工艺	4
1.2.3 传感器测试方案	4
1.2.3.1 扫描电镜测试	4
1.2.3.2 器件的电特性测试	4
1.2.3.3 生物检测实验	5
2 基于一维纳米材料的 NEMS 传感器研究进展	6
2.1 碳纳米管原位生长	6
2.2 碳纳米管生长后组装	9
2.3 碳纳米管的多层结构制造	16
2.4 NEMS 器件的电学特性研究进展	18
2.5 基于一维纳米材料 NEMS 器件制备方法的研究意义	23
3 面向 NEMS 器件的一维纳米结构流体组装	24
3.1 碳纳米管悬浮液的配制	24
3.2 组装碳纳米管的基片修饰与选择	25

3.2.1 基片修饰预处理	25
3.2.2 基片选择	27
3.3 流体定向组装碳纳米管	27
3.3.1 流体定向组装原理	27
3.3.2 流体组装实验装置设计	28
3.3.3 流体组装仿真计算	29
3.3.3.1 计算模型	29
3.3.3.2 仿真计算结果	31
3.3.4 流体组装实验	32
3.3.4.1 碳纳米管流体组装实验	32
3.3.4.2 其他一维纳米材料流体组装实验	34
3.4 碳纳米管方向一致性评价	36
3.5 本章小结	38
4 面向 NEMS 器件的一维纳米结构介电电泳组装	40
4.1 介电电泳组装概述	40
4.2 碳纳米管的介电电泳排列组装	42
4.2.1 介电电泳场强分布仿真	42
4.2.2 介电电泳实验	45
4.2.3 介电电泳组装的影响因素分析	46
4.2.3.1 电极宽度	47
4.2.3.2 电泳时间	48
4.2.3.3 电场模式	48
4.2.4 其他一维纳米材料的介电电泳组装	49
4.2.4.1 单壁碳纳米管	49
4.2.4.2 碳纳米纤维	50
4.2.4.3 Bi_2S_3 半导体纳米线	51
4.3 碳纳米管的单层有序多层结构制备	51
4.3.1 介电电泳结合 LBL 组装方法	51
4.3.2 介电电泳与 LBL 组装实验	52
4.3.3 碳纳米管单层有序的纵向多层结构	52
4.4 流体与介电电泳结合排列组装碳纳米管	54
4.4.1 流体参数选择	54
4.4.2 电场参数选择	57
4.4.3 流体结合电泳组装与电泳组装和流体组装比较	59

4.5 本章小结	61
5 面向 NEMS 器件的电接触性能研究	62
5.1 电接触的理论分析	62
5.2 碳纳米管金属引线制作方法	64
5.3 金属电极上沉积碳纳米管的接触特性研究	65
5.3.1 振动破坏实验验证接触可靠性	65
5.3.1.1 振动实验装置	65
5.3.1.2 加速度 1~10g 垂直方向振动对接触的影响	65
5.3.1.3 加速度大于 10g 的振动对接触的影响	67
5.3.2 高温退火改善接触研究	69
5.3.2.1 高温退火实验	69
5.3.2.2 实验结果分析	71
5.4 图形化金属包覆碳纳米管的引线接触研究	73
5.4.1 金属选择	73
5.4.2 金属引线电极制作	75
5.4.2.1 电极图形及工艺设计	75
5.4.2.2 金属腐蚀	77
5.4.2.3 接触状态比较	78
5.5 本章小结	79
6 NEMS 传感器在空气环境检测中的应用	80
6.1 NEMS 传感器应用于空气环境检测的研究进展	80
6.2 以硅纳米线为敏感元件的 NEMS 传感器	86
6.2.1 敏感元件	86
6.2.1.1 硅纳米线制备	86
6.2.1.2 硅纳米线的表面修饰	87
6.2.2 传感器结构	88
6.2.3 基于场效应晶体管结构的纳米线传感器检测原理	89
6.3 空气微生物检测系统	90
6.3.1 气溶胶发生装置	90
6.3.2 气溶胶样品采集	91
6.3.2.1 气溶胶静电采样原理	91
6.3.2.2 气溶胶采样器结构	93
6.3.2.3 采样器电场分布计算	95

· IV · 目 录

6.3.2.4 采样器的物理采集效率实验分析	96
6.3.2.5 NEMS 传感器检测用样品的输运	96
6.3.3 信号处理及显示装置	97
6.4 采用 NEMS 传感器检测实验	99
7 NEMS 传感器的发展趋势及应用前景展望	100
7.1 NEMS 传感器研究的发展趋势	100
7.1.1 纳米材料的制备及性能研究	100
7.1.2 器件的结构研究	101
7.1.3 器件的加工工艺	102
7.2 NEMS 传感器的应用前景展望	102
参考文献	103
后记	110

1 NEMS 传感器的结构及加工工艺设计

微机电系统 (MEMS) 具有体积小、成本低、易于集成和批量生产等优点, 在信息、军事、医疗、汽车、航天等领域有广泛的应用。近年来, 随着纳米材料和结构研究的深入, 将纳米材料、纳米结构和纳米加工与 MEMS 相结合, 形成了一个新的研究方向纳机电系统 (NEMS)。NEMS 通常涉及物理、化学、生物、材料、电子、机械等多门学科, 是一个多学科交叉的新科技领域。利用纳米材料及纳米结构表现出的独特的力、电、热、光、磁等性能进行新型纳传感器件的研究逐渐成为 NEMS 研究的一个热点。从纳米材料的效应和性质出发, 可以突破常规器件的性能极限, 实现具有高灵敏度、低功耗、低噪声的纳米器件和系统。

1.1 NEMS 传感器的敏感元件: 一维纳米材料

自 1985 年富勒烯和 1991 年碳纳米管发现以来, 研究者们就开始探索碳纳米管的制备方法和应用, 并由此推动了一维纳米材料的进一步研究。一维纳米材料是在二维方向上为纳米尺度, 剩下的一维方向为微米或宏观尺度的材料, 包括纳米管、纳米线、纳米带等。

1.1.1 纳米管、纳米线、纳米带

近年来, 不同材料构成的一维纳米结构不断被人们所发现并开展了大量应用研究。其中, 最具代表性的有碳纳米管、氧化锌纳米带、硅纳米线及金属纳米线。

1.1.1.1 碳纳米管

碳纳米管以其独特的力学、电学、化学特性, 成为全世界纳米技术的研究热点。高分辨率透射电子显微镜研究表明, 碳纳米管的每层柱面都可以看作是由六角网格状碳原子层卷曲形成的无缝圆柱体。根据形成碳纳米管的二维石墨面的卷绕方式不同, 碳纳米管的每层在结构上都可分为非螺旋型和螺旋型两类。碳纳米管的内径、外径、层数可以有很多变化。理想的多层碳纳米管可以看成是多个同轴圆柱组成的无缝圆管, 其层数可以从两层到几十层, 层间距约为 0.34nm 。其外径一般为几至几十纳米, 内径为 0.5 至几纳米, 长度为几至几十微米, 甚至几毫米^[1,2]。碳纳米管的直径和长度随不同的制备方法条件的变化而不同。根据直径和卷绕方向的不同, 碳纳米管表现出金属或半导体性质。目前, 还无法有效合成出

具有单一电学性质的碳纳米管。同时,大量实验研究证明实际的碳纳米管会存在多种缺陷。例如碳纳米管的横截面不总是圆形,外形有弯曲和扭结等^[3,4]。

目前,碳纳米管的制备、性能表征、器件制造等方面的研究已取得了很大进展。碳纳米管作为一维材料重量轻,六边形结构完美连接,强度极高,弹性模量高,同时具有纳米级直径微米级长度,长径比可达100~1000,以及SP²、SP³杂化几率不同而表现出优质的弹性。同时,理论计算和实验研究表明,一部分碳纳米管是良好的导体,而另一部分碳纳米管是半导体。日本 NEC 公司的研究人员已经证实,碳纳米管具有良好的导电性,其导电性仅取决于其几何尺寸。Dresslhaus 预言,利用这些电子特性,碳纳米管可用于记忆元件的电容或晶体管开关电路。物理学家 Broughton 认为,可以用碳纳米管制造出分子水平的线圈、活塞和泵等微型零件来组装成微形发动机或其他装置。近年来,国内外的相关研究还表明,碳纳米管可用作特殊的纳米探针,形成精细的纳米线路,制造敏感器件和执行器件,其优良的场发射特性还可用于显示器的开发等^[5~7]。

1.1.1.2 纳米线

与碳纳米管不同,通过有效控制合成条件,同种纳米线结构可表现出在物理、化学、电学、光学方面性质的一致性。根据组成材料的不同,纳米线可分为不同的类型,包括金属纳米线(如: Ni、Pt、Au 等),半导体纳米线(如: InP、Si、GaN 等)和绝缘体纳米线(如: SiO₂、TiO₂ 等)。

硅纳米线是一种新型的一维半导体纳米材料,线体直径一般在10nm左右,内晶核是单晶硅,外层有一SiO₂包覆层。研究证明单晶硅纳米线的直径可由催化剂纳米颗粒的直径来控制。硅纳米线由于特有的光学、电学性质如量子限制效应及库仑阻塞效应引起了科技界的广泛关注,在微电子电路中的逻辑门和计数器、场发射器件等纳米电子器件、纳米传感器及辅助合成其他纳米材料的模板中的应用研究已取得了一定的进展^[8]。

1.1.1.3 纳米带

纳米带是一种单晶,横截面呈矩形,四个侧面为特定晶面的独特一维纳米结构。氧化锌是一种半导体氧化物材料,是第一种被发现存在带状一维纳米结构的材料。典型的氧化锌纳米带长度为几百微米甚至几毫米。各种不同半导体材料的纳米带结构被合成。

纳米带具有特殊的电学、热学及机械等方面的性质。其中,氧化锌纳米带原子排列造成的极化产生了压电效应。相关研究人员借助具有导电探针的原子力显微镜,实现了氧化锌纳米带压电系数的测量。

1.1.2 一维纳米材料的机电性能

碳纳米管作为被发现的第一种纳米管材料,已有大量研究者对此开展了关于

碳纳米管性能的理论及实验研究。对碳纳米管的电性能理论计算表明, 大约 1/3 的碳纳米管呈现金属性, 另外 2/3 呈现非金属性。对碳纳米管的电学性能测量实验研究同样证明了碳纳米管既可表现为金属性也可表现为半金属性。同时, 实验研究表明碳纳米管具有优异的场发射性能。另外, 研究者采用透射电镜、原子力显微技术等试验方法实现了对碳纳米管的力学性能测量。实验证明, 碳纳米管具有很高的强度, 杨氏模量高达 1.8TPa。

纳米带的结构决定了其具有电学及机械方面的特殊性质。实验研究表明半导体纳米带的电导率随着纳米带表面的氧元素浓度增加而增加, 可通过控制外界温度或氧元素浓度改变纳米带的导电性能。氧化锌纳米带由于晶体中晶格结构具有非中心对称性, 采用具有导电探针的原子力显微镜测量出了氧化锌纳米带的压电系数。

一维纳米材料具有较高的长径比, 优良的电学性能、力学性能, 在 NEMS 传感器研究中具有广泛的应用前景。

1.2 基于一维纳米材料的 NEMS 生物传感器设计

1.2.1 NEMS 传感器系统设计

传感器由敏感元件、转换元件及辅助元件构成。基于一维纳米材料的 NEMS 传感器以一维纳米材料为敏感元件, 感知被测对象信息, 转化为便于测量的电信号。利用一维纳米材料优良的电学、力学性能, 国内外大量研究者已成功研制了 NEMS 生物传感器、NEMS 加速度传感器、NEMS 化学传感器、NEMS 压力传感器等, 这些新型传感器相对于传统传感器在某些性能上大大提高。

本书以 NEMS 生物传感器设计为例。NEMS 生物传感器检测的基本原理是被测对象与一维纳米材料表面结合后, 改变了一维纳米材料的电导, 从而实现被测对象的特异性检测。设计过程主要包括选择被测物检测的特定标记物, 对一维纳米材料进行表面修饰; 利用微电子工艺在单晶硅或多晶硅表面设计加工金属电极, 与一维纳米材料构成场效应晶体管结构见图 1-1, 采集一维纳米材料的电导变化值; 搭建信号调理电路对被测电信号进行后处理。

一维纳米材料的特定标记物修饰通常是针对标记物与化学生物基团的结合性, 对其进行一系列化学处理。

一维纳米材料与金属电极场效应晶体管结构的加工方法主要分为两种: 一种是将生长好的一维纳米材料通过组装工艺实现与金属电极的场效应晶体管结构;

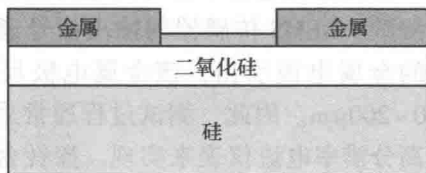


图 1-1 NEMS 生物传感器
场效应晶体管结构示意图

另一种是在已加工好的金属电极上固定催化剂，直接生长一维纳米材料。

传感器的信号调理电路采用微电子电路或传统电子电路进行信号滤波、放大、调制等最终实现信号的实时显示。

1.2.2 传感器加工工艺

根据一维纳米材料 NEMS 传感器的基本构成，传感器的加工工艺设计主要包括一维纳米材料的选择、制备和表面修饰，一维纳米材料与电极电路组装方法设计，以及基于硅微机械工艺的电极电路加工工艺流程设计。随着对一维纳米材料研究的深入，碳纳米管、纳米线、纳米带等典型一维纳米材料的性能、制备工艺以及表面修饰方法的研究已取得了大量成果，为成功研制一维纳米材料 NEMS 传感器提供了有力支撑。金属电极及电子电路用来采集一维纳米材料的信号变化，其加工工艺通常基于硅微机械加工工艺，常用的加工工艺有光刻、蒸镀、溅射、腐蚀等。

1.2.3 传感器测试方案

1.2.3.1 扫描电镜测试

NEMS 传感器的关键尺寸为纳米量级，且集成度高，研制过程中器件的结构、纳米材料的修饰成功与否、器件使用前后比对等均可采用高分辨率的扫描电子显微镜进行观测和分析。扫描电子显微镜能够直接观察样品的表面和三维结构，并进行原位成分分析。通过多种电子信号特征和 X 射线谱可以得到纳米材料的形貌和物理、化学等多种信息。扫描电镜利用扫描电子束从样品表面激发出各种物理信号来调制成像，其放大倍数可以从数十倍原位放大到数十万倍，乃至上百万倍。

1.2.3.2 器件的电特性测试

器件研制过程中自身的电特性需要进行多次测试。NEMS 传感器的输出信号通过硅基底上的金属电极引出，该金属电极尺寸通常为 $100\sim 200\mu\text{m}$ 。因此，测试过程通常采用探针台和高分辨率电流仪表来实现。探针台见图 1-2，由三自由度可调节的载物台、探针定位器、探针、显微镜等构成。通过调节探针定位器，使探针与器件的金属电极可靠接触，由探针引线将器件输出的电导或电流信号引出，利用高分辨率电流仪表进行实时测量。

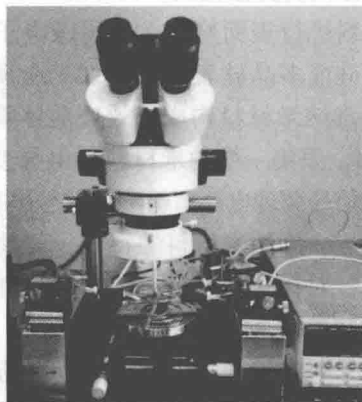


图 1-2 器件电特性测试系统实物照片

1.2.3.3 生物检测实验

NEMS 传感器在检测生物浓度、种类等方面表现出较高的灵敏度，但器件输出的电信号比较微弱，输出电流通常在微安量级或纳安量级，容易被噪声淹没。在对被测对象进行检测实验中，采用锁相放大器和前置放大器可将被测信号有效放大，使高频噪声信号衰减。

器件检测原理是被测对象与一维纳米材料表面特定修饰基团结合改变了电导，从而引起输出电信号随被测对象浓度变化而变化。一次检测过程结束后，必须对器件的敏感元件进行生物清洗，去除被测对象残留，以保证下一次测试的准确度。为了保证清洗效果，可采用微流体通道，将清洗液局限在器件的敏感元件区域反复冲洗。

目前，微流体通道比较常见的是采用 PDMS 加工研制。PDMS 是一种光刻胶。通过在甩胶台上甩胶、高温烘干、光刻显影等过程实现。微流体通道的最小尺寸由光刻机最小精度和显影技术决定。

2 基于一维纳米材料的 NEMS 传感器研究进展

一维纳米材料与微结构结合的纳器件制造过程中有可能突破常规器件的性能极限，并将实现超微型化和高功能密度化。以“Top-Down”为主要制造方式，结合“Bottom-Up”方式，可制造出纳机电传感器、纳机电执行器等。目前国内基于纳米管/纳米线的器件研究包括电子器件^[9~12]、光电器件^[13~15]、力学传感器^[16~18]、生化传感器^[19~21]以及场发射器件^[22~26]等。采用单根的或规律排布的碳纳米管可实现多种纳尺度结构，利用其独特的物理化学特性将得到高性能的纳米器件。定向定位排布组装一维纳米材料如纳米管、纳米线、纳米棒等，并在一维纳米材料阵列结构上施布引线，将是实现纳米器件的基础。

目前，基于一维纳米材料的器件制造方法主要分为两类。一类是在基板上图形化催化剂实现一维纳米材料的原位定向生长；另一类是将生长好的一维纳米材料，通过纯化、分散等处理后，利用机、电、液等外力驱动作用在基底上实现排布组装。

2.1 碳纳米管原位生长

目前，碳纳米管的生长方法主要包括化学气相沉积（CVD）、激光烧蚀和电弧放电等。直接生长定向定位的碳纳米管通常是通过图形化催化剂的方法来实现^[25]，见图 2-1。其中，催化剂的图形化由微制造工艺的光刻加工完成。

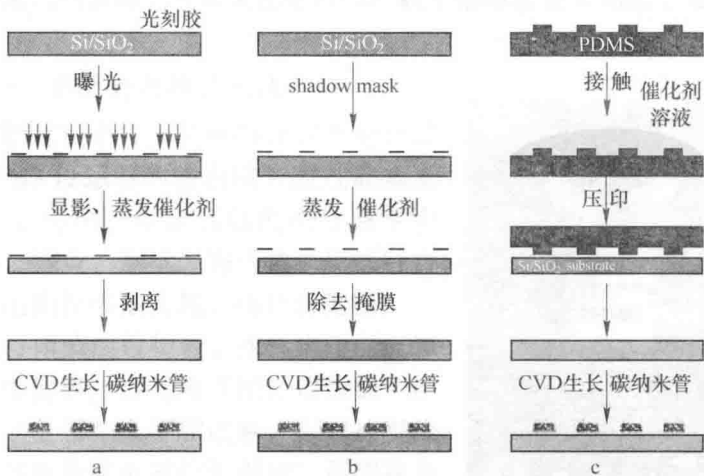


图 2-1 选择性生长纳米碳管的催化剂图形加工技术^[25]

a—标准光刻；b—掩膜版显影；c—软光刻

Yu W. J 等人通过在硅基板上采用 CVD 法选择性垂直生长碳纳米管制造了碳管场发射器，碳纳米管束在催化剂表面垂直有序生长^[27]。图 2-2 显示，在生长有碳纳米管的硅基板上甩胶，碳纳米管被固定在基板上，然后用化学机械抛光 (CMP) 得到高度一致的纳米碳管阵列实现了碳管的场发射器件。Tu Y 等人以图形化的镍纳米颗粒为催化剂，化学气相沉积生长碳纳米管垂直阵列，碳纳米管的密度可控在每平方厘米 $10^5 \sim 10^8$ 。图 2-3 显示，该阵列可用于碳纳米管的场发射研究和作为纳米电极阵列^[28]。除了在基板上垂直生长碳纳米管阵列外，Alexander 和 L. Marty 等人通过图形化催化剂，实现了碳纳米管在基板上的水平生长^[29-30]，见图 2-4 和图 2-5。L. Marty 等人通过在四电极上生长单壁碳纳米管，制造了碳纳米管的场效应三极管。

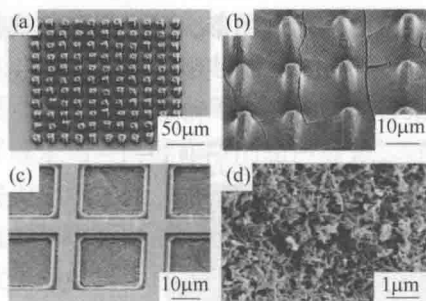


图 2-2 碳纳米管生长后加工场发射器件^[27]

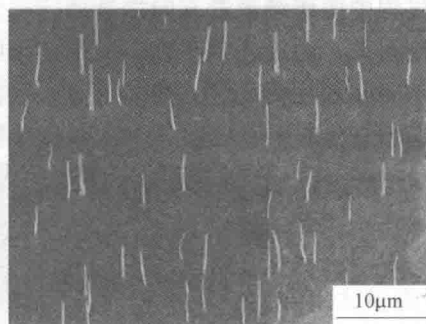


图 2-3 竖直方向排列的碳纳米管阵列^[28]

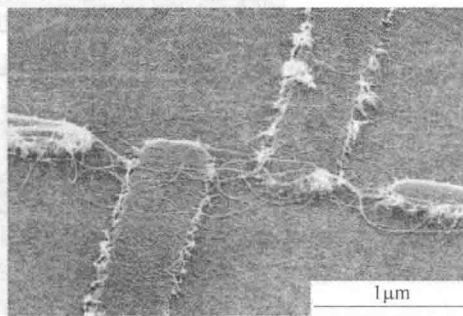
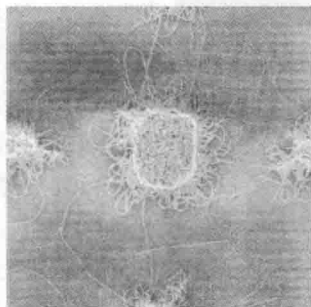


图 2-4 催化剂堆生长的碳管 SEM 图片^[29]

图 2-5 四电极上催化剂生长碳管 SEM 图片^[30]

Joselevich 等人提出一种定向生长碳纳米管的新方法^[31]。首先，图形化催化剂纳米颗粒。然后，在生长过程中施加一个平行于基板的局部电场，以此控制碳管沿着电场方向生长。基板为具有对电极的二氧化硅，碳纳米管在电场中极化，受电场力作用，平行于电场方向排列生长，见图 2-6。

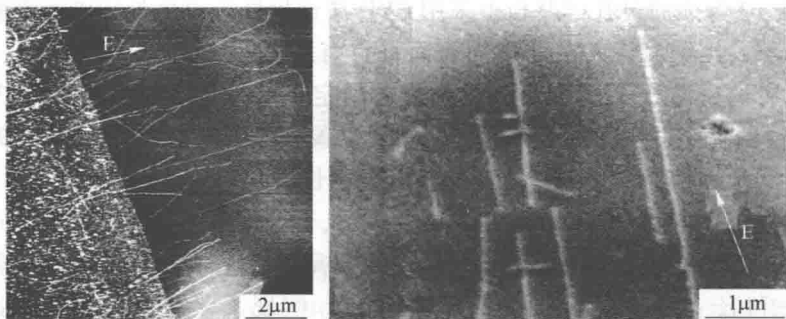


图 2-6 基板表面与电场方向平行生长的单壁纳米碳管的 AFM 图片^[31]

此外，Coskun Kocabas 等人利用具有特定晶向的基底，在 CVD 生长碳纳米管的过程中使碳纳米管方向性排列^[32]。所选基底为在 900℃ 温度下，退火 8h 的 ST 切割石英。通过光刻工艺，实现在基底上的铁蛋白催化剂图形，并在 900℃ 高温下 10min 氧化催化剂。冷却至室温后，在氢环境下 900℃ 时，甲烷或氢气流引导碳纳米管生长。高密度排列生长的单壁碳纳米管阵列见图 2-7 和图 2-8。

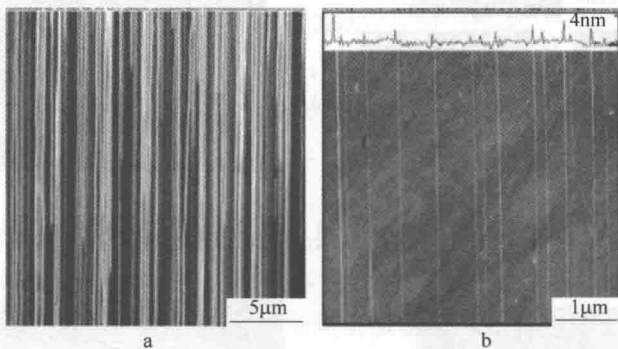


图 2-7 基底上碳管的 SEM 和 AFM 照片^[32]

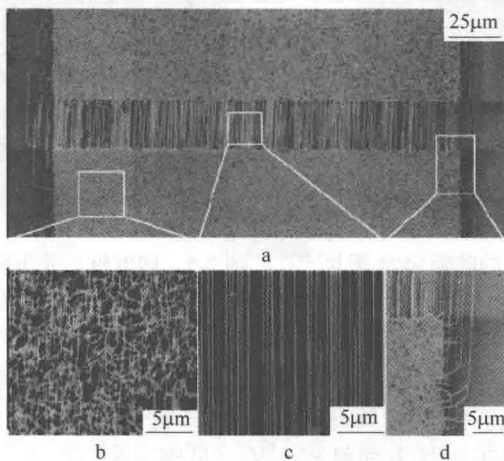


图 2-8 电极隧道间生长单壁碳纳米管^[32]

图形化催化剂直接生长法不需后处理。但是,要实现一根一根碳纳米管等一维纳米材料沿着基底的定向生长,还有很多困难。而且,直接生长的 CNT 有金属性、半导体性等不同性质,含有缺陷、杂质,影响器件的性能。同时,生长过程中的高温要求与微电子制造工艺很难兼容。

2.2 碳纳米管生长后组装

碳纳米管生长后组装方法的灵活性使其更广泛地应用到纳器件的制造过程中。近年来,将生长好、分散处理后的纳米管通过外界作用力在基底上实现定向排布的方法受到了极大的关注,被认为是实现纳米器件有效的方法。其排布组装方式有流体排布、电场辅助沉积、化学选择性沉积、磁场驱动或用 AFM 直接操作等多种,或者将某几种方式结合。这种排布组装方法在排布前可对纳米碳管等纳米结构进行纯化处理,大大减少了其自身存在的缺陷和杂质。

以电泳或介电泳原理为基础的电场辅助沉积碳纳米管方法的研究较为广泛^[33~36]。Wakaya 等人在图形化的电极上施加直流电压来排布碳管^[37]。碳管悬浮液采用异丙醇作溶剂超声分散, Ti/Au 金属电极通过电子束刻蚀工艺制造,基底为二氧化硅。在基片上滴加碳管悬浮液,温度控制在 5~50℃。电极上施加直流电压进行电泳,发现当电极间隙小于 3μm、温度在 50℃ 时,电泳沉积碳管的数量随电压大小变化。图 2-9 显示, 10V 直流电压电泳后电极间堆积大量碳管,而 1V 电泳形成了单根碳管在针状电极间的搭接。

Hee-Won Seo 等人采用交流电泳实现了单壁碳纳米管束的方向性和选择性的组装,并分析了所施加电场大小和方式对碳管组装的影响^[38]。图 2-10 显示,相同频率下,随着交流电泳电压幅值增加,碳管的密度增大。与直流电泳相比,交流能更有效地将纳米管溶液中的纳米管和碳污染物分隔开,选择性的排布纳米管。

直流或交流的电泳均可实现电极上的碳纳米管组装。在此基础上, Chung 等提出通过施加带有直流偏置的交流信号,单根多壁碳管可在微米尺度间隙的电极上实现定向沉积^[39]。指出利用交直流复合电场的强度吸引和排布碳管到电极间隙上。见图 2-11。当第一根碳管沉积后,电极间隙间的直流电场成分由于电路中的大电阻被削弱,仅有交流成分不能足够强的去迅速吸引更多的碳管到电极间隙。通过调整交直流成分的强度可防止碳管的进一步沉积。碳管沉积条件经验上为控制直流与交流的比率是总的电场有效值为 0.544VRMS/mm。而其他的杂质颗粒由于不能及时响应交流电场而不会在碳管沉积之前被吸引到电极间隙。在进一步研究中,研究人员进行了多壁碳管在交直流复合场中沉积的交流直流比率的参数化研究。研究人员指出:频率为 5MHz 的交流主要实现选择性吸引而直流电场引导单根沉积。Lu 等以频率 5MHz,电压 20Vpp 交流和 1.5V 直流进行电泳组装,实现了在沟槽深度为 70nm 且间隙 5μm 的电极间沉积单根碳纳米管^[40]。