



国家出版基金资助项目·“十二五”国家重点图书

先进制造理论研究与工程技术系列

NANOSTRUCTURE AND NANOMECHANICS
MEASUREMENT TECHNOLOGY

纳米尺度几何量和机械量测量技术

● 赵学增 王伟杰 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目·“十二”
先进制造理论研究与工程技术系列

NANOSTRUCTURE AND NANOMECHANICS
MEASUREMENT TECHNOLOGY

纳米尺度几何量和机械量测量技术

● 赵学增 王伟杰 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

纳米科学与技术是近年来在全球范围内广受重视的一门飞速发展的新兴学科,而纳米测量学与纳米材料学、纳米电子学、纳米生物学、纳米机械学和纳米光学一样,已经成为纳米科学与技术的重要研究方向之一。本书在总结作者科研工作的基础上,较全面地对纳米尺度线宽(CD)测量,纳米尺度边缘粗糙度(LER)测量,纳米尺度微力、杨氏模量和刚度测量以及微纳尺度固液界面边界条件测量进行了论述。书中多为作者多年从事纳米测量相关研究的科研成果、实践经验与心得体会。

本书对从事该领域研究工作的科研人员具有一定的借鉴意义。

图书在版编目(CIP)数据

纳米尺度几何量和机械量测量技术/赵学增,王伟杰著.
—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2012.6
ISBN 978-7-5603-3864-4

I. ①纳… II. ①赵…②王… III. ①几何量-测量
②机械量-测量 IV. ①TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 289018 号

责任编辑 田 秋 范业婷

封面设计 高永利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 18.5 字数 436 千字

版 次 2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-3864-4

定 价 68.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

序

纳米科学与技术是当代科技发展的前沿研究领域之一,它已引起世界各国的普遍重视,它与生物技术和信息技术并列为 21 世纪的三大科技,是目前世界各发达国家高技术竞争的制高点。而纳米测量技术可以为在纳米尺度上研究材料和器件的结构及性能、发现新现象、探索新方法、开发新技术,提供纳米尺度的检测与表征手段。

正如美国前总统克林顿所指出“纳米计划与开发的关键是要开发新的实验手段以提高测量和控制纳米结构物质的能力,开发新的测量标准”。美国在纳米测量技术领域对美国国家标准和技术研究院(NIST)投入了大量研究资金。日本国家计量研究所(NRLM)、英国国家物理研究所(NPL)和德国物理技术研究院(PTB)也都得到了各自国家的大力支持。

在人类科学与技术发展史上,如今的纳米科技正在开启一个崭新的高科技时代,而纳米测量技术将成为纳米科技进一步发展和走向实用化的重要工具和手段。1982年,国际商业机器公司(IBM)开发出了世界上第一台扫描隧道显微镜(STM),使人类直接观察到了原子,进入了纳米世界。以后,各种新型扫描探针显微镜(SPM),如原子力显微镜(AFM)、激光力显微镜(LFM)、磁力显微镜(MFM)、静电力显微镜(EFM)、扫描近场光学显微镜(SNOM)等不断被开发出来,它们大大扩展了被观察的材料范围和应用场所,使得纳米科学与技术的研究工作得以开展。

2003年,STM的发明人、诺贝尔奖金获得者 H. Rohrer 致信江泽民同志时提到“当微米成为新的精度标准并成为工业革命技术基础的时候,最早和最好学会并使用微米技术的国家都在工业发展中占据了巨大优势,同样,未来的技术将属于那些以纳米为精度标准、并首先学习和使用它的国家”。可见纳米科学技术不但给世界各国提出了挑战,同时也提供了一个全新的发展机遇。因此,抓住机遇,深入开展纳米测量技术的研究和开发工作,可以为我国在纳米技术时代的国际竞争中赢得优势和提供支撑。纳米测量技术必将成为人类征服自然、探索自然的一个强有力的工具。

本书的作者赵学增教授和王伟杰副教授长期从事纳米测量技术的教学和科研工作,在这一领域富于创见、取得过多项研究成果,对纳米测量技术有着深入的理解。作者在总结前期科研工作的基础上,全面地对纳米尺度线宽(CD)测量,纳米尺度边缘粗糙度(LER)测量,纳米尺度微力、杨氏模量和刚度测量以及微纳尺度固液界面边界条件测量方面进行了论述。

本书内容丰富、条理清晰,系统地叙述了纳米尺度几何量和机械量测量技术的相关理论和方法。书中内容选自作者从事纳米测量相关研究的科研成果、实践经验与心得体会,对从事该领域的学习和研究工作的科研人员,不仅具有借鉴和帮助作用,而且具有重要的参考价值。



中国工程院院士
哈尔滨工业大学副校长
2012年6月18日
于哈尔滨工业大学

前 言

纳米科学技术是近年来在全球范围内广受重视的一门飞速发展的新兴学科,纳米科学技术的发展涉及微电子学、光学、材料学、机械学、生物与生命等科学和技术领域,这些科学和技术领域都要求提供纳米、甚至亚纳米级的测量与表征手段,目前,发展与之相适应的纳米测量理论与技术已经成为一项迫切需要解决的重要课题。

纳米测量技术是纳米科学技术的重要研究方向之一,纳米科学技术的快速发展,不但给纳米测量技术提出了挑战,同时也给纳米测量技术提供了一个全新的发展机遇。为在纳米尺度上研究材料和器件的结构及性能、发现新现象、探索新方法、开发新技术,首先需要建立纳米尺度材料与器件的检测与表征手段,这正是纳米测量技术所要解决的问题。纳米测量技术是对分子和原子尺度的产品所涉及的各种参数,如几何量、力学量和电学量等进行检测,并描绘和表征其微观形貌特征和力学、电学特性,它是研究新型纳米材料和器件及其新效应的基础。

纳米测量技术指尺度为 $1 \sim 1\,000\text{ nm}$ 的测量技术。它与纳米加工技术和纳米结构并列为纳米技术的三大研究主题。纳米测量技术伴随着纳米科学进入 21 世纪后,不仅带动了科技的进步,同时也促进了经济的发展,它已成为人们探索自然、征服自然的一个强有力的工具。纳米测量技术涉及传感器技术、探针技术、定位技术和扫描探针显微镜 (SPM) 技术等。

纳米测量技术的发展主要有两方面:一是在传统测量方法的基础上,应用先进的测试仪器解决微电子学、光学、材料学、机械学、生物与生命等科学和技术领域中的纳米测量问题;二是发展和建立新的测量技术,利用微观物理和量子物理等前沿领域中的最新研究成果,寻求新的测量原理和多种技术的综合应用,并将其应用于测量中,这是未来纳米测量技术发展的必然趋势。

目前,纳米测量技术领域中也存在着一些限制它发展的问题。首先,建立相应的纳米测量环境一直是实现纳米测量亟待解决的问题之一,而且不同的测量方法中需要的纳米测量环境也是不同的。其次,表征和检测也是纳米测量技术所面临的挑战之一,由于人们对纳米材料和器件的许多基本特征、结构和相互作用的了解还不是很充分,使其在设计和制造中存在许多盲目性,现有的测量表征技术存在着许多需要进一步解决的问题。再次,由于纳米材料和器件的特征长度很小,测量时易产生较大误差,以至测得的信息并不能完全代表其本身特性。以上这些都是限制纳米测量技术发展的瓶颈,因此,纳米尺度下的测量无论是在理论上,还是在技术和设备上,都需要进一步的研究和发展。

本书在总结作者科研工作的基础上,较全面地对纳米尺度线宽 (CD) 测量,纳米尺度边缘粗糙度 (LER) 测量,纳米尺度微力、杨氏模量和刚度测量以及微纳尺度固液界面边界条件测量四个方面的相关理论和方法进行了论述。书中内容是作者多年从事纳米测量相

关研究的科研成果、实践经验与心得体会的总结和提炼。

本书深入地论述了纳米尺度几何量与机械量的测量中的若干问题。第1章论述了纳米尺度线宽(CD)测量技术,针对使用原子力显微镜(AFM)测量纳米尺度线宽所存在的一些难题展开论述,包括线宽测量模型、图像处理、误差修正、测量不确定度估计等,分别提出了改进方案或解决方法;第2章论述了纳米尺度边缘粗糙度(LER)测量技术,对纳米尺度 LER 测量与表征方法的研究现状和发展趋势进行了评述,针对 AFM 测量纳米尺度 LER 所存在的 LER 定义、测量模型、表征方法、误差分析及修正等问题展开研究,给出了相应的解决方法或改进方案;第3章论述了纳米尺度微力、杨氏模量和刚度测量技术,结合 AFM 力学测量原理和技术特点以及微悬臂梁的自身特点,就微悬臂梁刚度测量中存在的一些难题展开研究,包括微悬臂梁频率响应模型、微悬臂梁杨氏模量动态测量、流体环境对微悬臂梁频率响应的影响、安装倾斜角等因素对微悬臂梁工作刚度的影响等,分别提出了改进方法或解决方案;第4章论述了微纳尺度固液界面边界条件测量技术,应用 AFM 研究了固液界面纳米气泡与样品基底的相互作用,改进了接触模式 AFM 边界滑移测量方法并提出采用敲击模式 AFM 法对不同润湿性表面进行了测量,建立了纳米气泡尺寸及分布密度与边界滑移之间的关系。

本书是在赵学增教授和王伟杰副教授多年从事纳米测量方面的科研工作的基础上完成的,在此感谢国家自然科学基金委员会、黑龙江省科技厅、哈尔滨市科技局、哈尔滨工业大学微纳米技术研究中心相关项目的资助。书中部分内容选用了作者的博士生褚巍、李洪波、李宁、王飞、王玉亮、肖增文、王岳宇和周法权的相关研究成果。全书由赵学增教授和王伟杰副教授统稿,黄文涛副教授、陈芳讲师和潘昀路博士参与了编写和整理工作,美国国家标准和技术研究院(NIST)的 T. V. Vorburger 博士、Joseph Fu 先生和美国俄亥俄州立大学机械工程系的 Bharat. Bhushan 教授也对本书提出过很好的意见,特此表示感谢。

著者 赵学增 王伟杰

2012年6月

于哈尔滨工业大学

目 录

第 1 章 纳米尺度线宽(CD)测量	1
1.1 概述	1
1.1.1 纳米尺度线宽(CD)测量研究的应用背景	1
1.1.2 Nano 1 线宽测量国际比对项目	3
1.1.3 常用的线宽测量技术和方法简介	4
1.1.4 纳米线宽(CD)测量的研究现状	6
1.1.5 目前线宽测量工具存在的缺点与不足	8
1.2 原子力显微镜 AFM 及其在线宽测量中的应用	9
1.2.1 原子力显微镜概述	9
1.2.2 AFM 在线宽测量中的应用	12
1.2.3 原子力显微镜的最新发展	14
1.3 线宽的测量模型与算法	15
1.3.1 基于最小二乘法原理的测量模型	16
1.3.2 基于最小二乘模型的测量结果分析	21
1.3.3 使用不同探针测量结果的比较	24
1.4 扫描图像数据的分析及误差修正	28
1.4.1 探针膨胀作用的消除	28
1.4.2 扫描图像的滤波去噪	33
1.4.3 样本倾斜位置的修正	38
1.5 线宽测量误差及不确定度分析	40
1.5.1 不确定度的估计与合成	41
1.5.2 线宽的计算及误差修正	42
1.5.3 线宽测量的不确定度分析	43
1.5.4 实验与不确定度值的估算	46
1.6 双图像拼接法的研究	49
1.6.1 双图像拼接法的提出	50
1.6.2 刚体的空间位置变换	51
1.6.3 扫描图像的匹配	53
1.6.4 图像的插值和拟合	56
1.6.5 实验与结果分析	57
参考文献	60

第 2 章 纳米尺度边缘粗糙度 (LER) 测量	69
2.1 概述	69
2.1.1 纳米尺度边缘粗糙度 (LER) 测量的研究背景	69
2.1.2 线边缘粗糙度的研究内容及其发展	70
2.1.3 线边缘粗糙度测量技术的研究现状	72
2.1.4 线边缘粗糙度测量的关键问题分析	79
2.2 线边缘粗糙度的定义及其表征参数的研究	81
2.2.1 线边缘粗糙度测量的需求分析	81
2.2.2 线边缘粗糙度的定义研究	87
2.2.3 线边缘粗糙度的表征参数	89
2.3 基于 AFM 的线边缘粗糙度测量模型	92
2.3.1 测量样本与测量条件	93
2.3.2 线边缘粗糙度测量模型的建立	94
2.3.3 测量结果与分析	100
2.4 线边缘粗糙度的多尺度表征方法研究	104
2.4.1 线边缘粗糙度特性分析	105
2.4.2 基于冗余第二代小波变换的 LER 多尺度表征	107
2.4.3 随机轮廓仿真与分析	119
2.4.4 测量结果与分析	122
2.5 AFM 测量线边缘粗糙度影响因素的研究	126
2.5.1 探针对扫描图像的影响	127
2.5.2 AFM 扫描图像噪声的影响	130
2.5.3 压电晶体驱动精度的影响	133
2.5.4 扫描采样间隔的影响	136
参考文献	139
第 3 章 纳米尺度微力、杨氏模量和刚度测量	150
3.1 概述	150
3.1.1 纳米尺度力学量测量的研究意义和背景	151
3.1.2 AFM 在纳米尺度力学测量中的应用状况	152
3.1.3 微悬臂梁制造与应用状况	153
3.1.4 微悬臂梁刚度测量的研究现状	154
3.2 微悬臂梁频率响应特性研究	157
3.2.1 微悬臂梁振动分析	157
3.2.2 基于有限元法的微悬臂梁频率响应特性仿真	161
3.2.3 杨氏模量与离面弯曲固有频率关系模型	164
3.3 流体环境对微悬臂梁频率响应影响研究	165
3.3.1 简化分析法	166

3.3.2	微悬臂梁尺寸效应和流固耦合效应	169
3.3.3	简化气弹模型方法	171
3.3.4	计算流体力学方法	175
3.4	微悬臂梁刚度测量方法研究	179
3.4.1	微悬臂梁杨氏模量测试	179
3.4.2	微悬臂梁刚度测量	185
3.4.3	刚度测量结果与分析	188
3.5	微悬臂梁刚度校正	190
3.5.1	安装倾斜角对刚度的影响分析	191
3.5.2	针尖位置对微悬臂刚度的影响分析	193
3.5.3	接触刚度对微悬臂梁刚度影响的分析	195
3.5.4	面内变形对刚度的影响分析	198
3.5.5	等效刚度综合校正	200
	参考文献	202
第 4 章	微纳尺度固液界面边界条件测量	209
4.1	概述	209
4.1.1	研究背景	209
4.1.2	疏水表面纳米气泡研究进展	212
4.1.3	固液界面边界滑移研究进展及其测量技术	214
4.1.4	纳米气泡与边界滑移关系研究进展	220
4.1.5	纳米气泡与边界滑移研究中存在的问题	220
4.2	聚苯乙烯表面纳米气泡 AFM 成像	222
4.2.1	改进的液体中微悬臂夹持器	222
4.2.2	聚苯乙烯表面纳米气泡特征	223
4.2.3	影响纳米气泡成像扫描参数	226
4.2.4	力调制模式下探针与纳米气泡的相互作用研究	229
4.3	纳米气泡产生纳米凹痕的机理研究	233
4.3.1	纳米气泡存在对聚苯乙烯表面的影响	233
4.3.2	疏水表面纳米凹痕形成	235
4.3.3	纳米凹痕形成机理	237
4.4	表面纳米结构提高纳米气泡非移动性研究	240
4.4.1	纳米尺度动态接触角测量技术	241
4.4.2	纳米气泡非移动性理论模型	244
4.4.3	纳米气泡非移动性实验验证	247
4.5	固液界面滑移长度测量方法的研究	252
4.5.1	纳米气泡与边界滑移关系模型	253
4.5.2	实验装置及样品制备	254
4.5.3	接触模式 AFM 滑移长度的测量	257

4.5.4 敲击模式 AFM 滑移长度的测量.....	263
4.5.5 纳米气泡与边界滑移关系的实验验证	267
参考文献.....	270
附录 作者发表的与本书相关的文章目录.....	279
术语索引.....	282

第 1 章 纳米尺度线宽 (CD) 测量

本章在国内外相关研究的基础上,根据原子显微镜(AFM)测量技术的实际特点,针对线宽测量这一热点纳米测量领域中所存在的一些难题展开讨论,内容主要包括以下几方面:

(1) 根据 AFM 测量数据的特点以及线宽测量的实际工业应用,提出一个合适的纳米尺度线宽定义,建立一个线宽测量模型。由于目前在测量纳米尺度线宽时,没有统一的定义,无法进行测量结果的比较,所以需要建立一个合理的测量模型和明确线宽的定义,以便不同测量者从一组相同数据中能得到可以进行比较的线宽测量结果。

利用 MATLAB 开发相应的应用软件,能根据算法从 AFM 输出数据中计算线宽尺寸并进行相关的分析。

(2) 对 AFM 的线宽测量数据进行分析,讨论探针的膨胀作用、测量噪声以及样本放置倾斜等因素导致的测量误差。针对探针的膨胀作用,使用数学形态学方法从测量图像中得到样本的恢复图像。分析测量数据中可能引入的噪声,分别提出各自数据处理方法,在尽量不带来人为数据误差的情况下滤波去噪。分析样本的测量数据,得到样本绕 y 轴和 z 轴的偏转信息,从线宽的计算结果中加以修正,得到更真实的线宽测量值。

(3) 分析 AFM 仪器、探针、样本、测量环境及算法等各种因素对测量精度所造成的影响,确定纳米尺度线宽测量的误差源及不确定度分布情况。建立一个客观合理的不确定度估计体系对检测结果的准确性和可靠性至关重要。只有给出合理的不确定度分布估计,才能正确理解各误差源对测量精度的影响大小,减小测量误差,提高测量精度。

(4) 针对探针形貌和尺寸对测量结果的影响问题,选用碳纳米管作为 AFM 探针。由于碳纳米管探针在制备过程中不能保证呈垂直状态,所以测量的线宽样本图像中常常一侧的边墙有较大的失真,因此提取出的线宽值并不可靠。经过分析和研究,提出一种双图像拼接方法,经过一次测量后把样本旋转 180° 重新测量,选取两幅图像中各自好的一侧边墙数据,把它们拼接成一幅图像,并进一步从拼接图像中提取更为真实的两侧边墙角和线宽值。研究旋转前后两幅测量图像的匹配方法,使得样本上的一个物理点确定在两幅图像上相应的像素位置,以便进行有效的拼接,提取更加真实合理的宽度值。

1.1 概 述

1.1.1 纳米尺度线宽 (CD) 测量研究的应用背景

在图 1.1 所示的几种典型的纳米尺度几何特征参数中,针对宽度测量的研究是当前纳米测量研究领域的热点问题之一,这是随着集成电路制造业、数据存储工业和微机电系

统等超精加工行业的不断发展和在工业生产中的广泛应用而形成的。

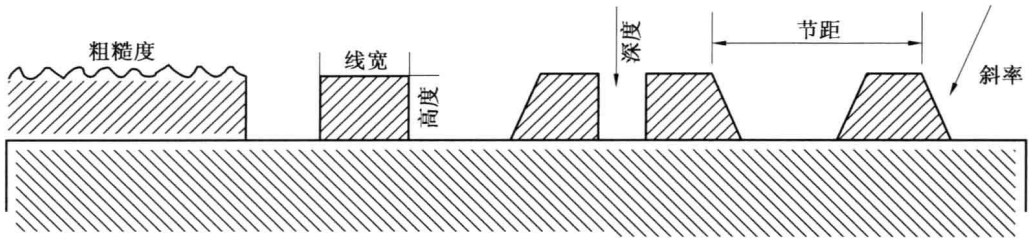


图 1.1 几种典型的纳米尺度几何特征参数

从 20 世纪 60 年代集成电路诞生以来,集成电路生产工艺得到了突飞猛进的发展,单个芯片中集成度越来越高,图形线宽越来越细。半导体基片上最小线宽被称为极限尺寸(Critical Dimension, CD)。70 年代 CD 从 $10\ \mu\text{m}$ 量级向 80 年代 $5\ \mu\text{m}$ 过渡,到 80 年代末期为 $1\ \mu\text{m}$,直到 90 年代进入亚微米尺度。晶圆的面积也由 1 in 扩大到 5 in、6 in、12 in,直到目前 18 in,所以光刻及掩膜技术也越来越复杂,越来越精细,对工艺水平的要求也越来越高^[1]。1965 年 4 月,美国仙童公司的 Gordon Moore 发表了闻名于世的“摩尔定律”。他发现每隔 18 ~ 24 个月,芯片上晶体管数目就增加一倍。40 多年来,世界半导体产业的发展一直遵循这条定律^[2]。根据来自于美国、日本、韩国、中国台湾和欧洲 800 多名半导体专家耗时两年完成的国际半导体技术发展蓝图(ITRS 2011 版)预测^[3],线宽在 2011 年和 2018 年将达到 22 nm 和 11.9 nm,见表 1.1。

表 1.1 ITRS(2011) 所预测的 DRAM 线宽

年份	2011	2013	2015	2017	2018
DRAM 线宽/nm	22	18	15	13.0	11.9

典型的线宽控制精度应小于其最小特征尺寸,要确定是否满足这些限制,测量技术的自身误差一定要低于控制限制。根据仪器制造原则,测量误差应为工艺误差的 $1/3 \sim 1/10$ ^[4]。目前微处理器(MPU)上的线宽为 22 nm,测量工具精度要求为 2.2 nm,到 2018 年线宽将减小到 11.9 nm,测量工具测量精度将为 1.2 nm。晶片中的布线和元件的线宽、线间隔、膜厚、表面粗糙度及其位置尺寸对器件中各个元件的电特性参数和性能指标及分布电容、分布电感、绝缘性能等电气特性具有越来越重要的影响,已成为影响器件质量和成品率的重要因素^[5]。极限尺寸连续不断地缩小,使得制造过程中的允许公差也相应地不断缩小,对线宽测量范围和精度的要求也不断提高。

根据量子物理的预测,应用目前结构原理的集成电路能够正常工作的最小线宽为 15 nm,而目前闪存器件(Flash)的线宽已经达到 22 nm,所以半导体制造技术发展的历史拐点即将到来。15 nm 级别工艺将采用全耗尽型晶体管技术(Fully Depleted, FD),下一步考虑将垂直型晶体管(即立体结构晶体管)制造技术如三门晶体管,finFET 等投入使用,如图 1.2 所示。

目前可能实现的量子器件有量子井、量子线和量子盒等。它们的尺寸在 10 ~ 30 nm 的范围中,相应的尺寸测量公差在亚纳米到几个纳米之间。

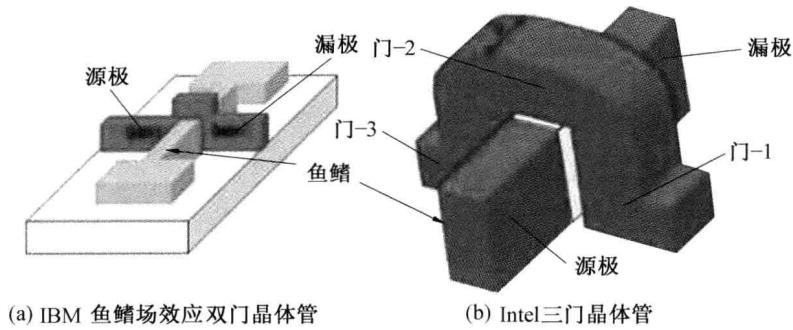


图 1.2 立体结构晶体管

数据存储工业生产具有几个微米表面特征的信息存储载体及相应的读写设备,也需要进行微小尺寸线宽的测量^[6]。磁盘存储和光盘存储是目前数据存储工业中最重要的两种数据存储技术,而这两种技术目前都需要在微米和亚微米尺度上测量线宽和其他表面特征。随着单位表面上数据存储量的增加,表面特征的尺寸相应减小。此外,如果数据存储工业将目前的二进制编码改为变深度或变宽度的多进制编码,为保持数据的完整性所需要的尺寸允许公差带也将随之相当程度地紧缩,达到纳米尺度。这要求针对出现的新问题研究新方法和开发新技术,以满足数据存储工业对纳米尺度线宽测量的要求。

微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)是从微机械发展而来的,微机械指利用光刻技术制造微米或纳米尺度的零件、部件或简单构造的机械系统。随着加工精度的不断提高,目前已经出现了具有几个微米直径的微型齿轮,它的齿距、齿宽等几何参数的测量都需要在纳米尺度上进行。而微机电系统更是集光机电于一体,利用微细加工技术,将机械构件、光学系统、驱动部件、电控系统集成成为一个可以驱动,完成特定功能的微细复杂系统。目前,一些超精密部件、超精密衍射光栅等器件的加工精度已达5 nm^[7]。与半导体制造业关心绝缘与导电,数据存储工业关心存储数据的完整性不一样,由于制造和装配的需要, MEMS领域更关心溯源型尺寸测量。

以上领域的不断发展对纳米尺度线宽的测量范围和测量精度提出了越来越严格的要求,这促使研究者在测量方法、测量手段上不停地进行研究和改进,以满足更精确的测量目的。

1.1.2 Nano 1 线宽测量国际比对项目

在纳米测量中,还没有一种可靠的通用尺度标准。由于受仪器本身和环境等诸多因素影响,用不同仪器检测同一样本,或用同一仪器在不同环境下测量同一样本,结果可能迥然不同^[8]。在缺少更高精度测量标准样本的情况下,往往采用比对的方法使测量结果趋向一致。为解决这些纳米级特征尺寸的测量问题,在1998年6月国际测量局BIPM的会议上,尺寸测量工作组WGDM第七讨论组(纳米测量组)将纳米测量列入国际关键比对项目,并确定了首先进行的纳米尺度基本特征的5个比对项目^[9],列于表1.2。

目前, Nano 2(高度)和 Nano 4(一维栅,即节距)的比对工作在测量方法、技术和工具等方面已经取得了较大进展和成果,建立了比较完善的测量模型和算法以及不确定度估计方法和标准样本等。中国计量科学研究院也参加了其中 Nano 2(高度)的测量比对工作。

表 1.2 WGDM 第七讨论组确定的 5 个纳米特征尺寸比对项目

项目名称	比对内容	主持单位
Nano 1	宽度(Linewidth)	美国 NIST(National Institute of Standards and Technology)
Nano 2	高度(Height)	德国 PTB(Physikalisch – Technische Bundesanstalt)
Nano 3	线刻度(Line scales)	德国 PTB(Physikalisch – Technische Bundesanstalt)
Nano 4	一维栅(1D gratings)	瑞士 METAS(Swiss Federal Office of Metrology and Accreditation)
Nano 5	二维栅(2D gratings)	丹麦 DFM(Danish Institute of Fundamental Metrology)

由于相关工业领域的迫切需要,加上 Nano 1 国际关键比对项目的推动,使得世界各国的研究人员对纳米线宽的测量给予了越来越多的关注。

作为 Nano 1 关键比对牵头单位的 NIST 曾经在 1999 年 3 月提交了一份技术协议草案,公布了 Nano 1 项目比对标准样本的选择,对其使用方法、保管、运输、测量和不确定度的估算提出了规范,为 Nano 1 纳米线宽测量的国际关键比对奠定了初步的基础。当时报名参加这一比对项目的有德国 PTB、日本 NRLM 等 8 个国家计量院。图 1.3 所示是选定为 Nano 1 关键比对的标准测量样本 SRM 475。

然而,由于技术上的困难,Nano 1 线宽比对项目在此后的几年内,在研究上一直没有取得突破性进展,目前也还处于比对工作的初级阶段。

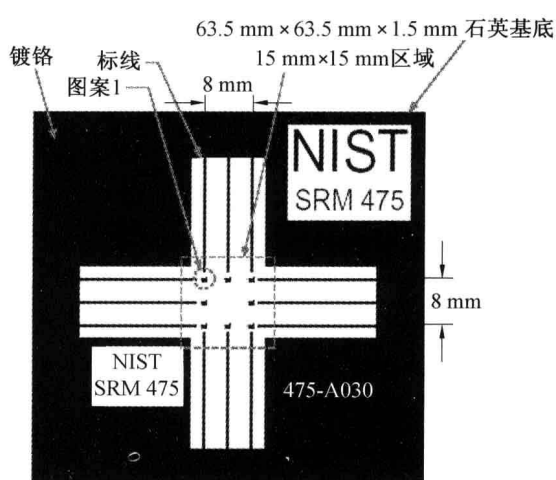


图 1.3 NIST 选定的 Nano1 项目比对样本 SRM475

1.1.3 常用的线宽测量技术和方法简介

随着测量技术的发展以及 IC 芯片集成规模的不断提高,先后有光学显微镜、扫描电子显微镜、扫描透射显微镜、原子力显微镜等多种仪器应用到纳米尺度刻线形貌和宽度的测量中^[10]。

(1) 光学测量方法。从集成电路制造业发展之初到 20 世纪 80 年代中期,光学方法由于其非破坏性、高测量速度的优点在线宽测量中被普遍采用^[11,12]。但是由于阿贝极限的作用,光学方法的分辨率只能达到波长的一半。波长与特征尺寸相近时,将导致复杂的散射域,图像结构难以识别。所以当超大规模集成电路出现后,线宽缩小到亚微米级,光学方法已不再适应线宽的测量。文献[4,13,14]中介绍了光学方法精度上的缺点对 IC 制造的影响,并讨论了用来替代光学方法的仪器和标准。近年来光学方法已经逐渐被共焦扫描显微镜、扫描探针显微镜及 SEM 等具有更高分辨率的仪器所取代。

(2) 电子显微镜。电子显微镜可分为扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)两大类。SEM 是目前集成电路制造业中广泛使用的一种测量方法。聚焦电子束

垂直于被测物体进行扫描,通过检测其背向散射电子和二次发射电子的信号变化获得样本表面信息。电子束对边缘变化特别敏感,所以 SEM 非常适合二维水平结构的测量。由于 SEM 的测量速度快,因此在集成电路生产测量中广为应用^[15-17]。但 SEM 应用于线宽测量也存在许多不足之处:一是测量过程必须在真空中;二是信号受材料的影响很大,只能检测导体和半导体。另外对边缘几何形状的变化非常敏感,因此在绝对测量时,其信号的数学模型非常复杂^[4]。

TEM 的原理与扫描电子显微镜类似,只不过它采集的是透过样本的电子。它的缺点与扫描电子显微镜也类似,高精度测量时要求超高真空,样本需要金属镀膜处理,而且不能太厚造成阻挡电子穿透,测量后的样本会因辐射而受到不同程度的损害^[18]。

(3) 扫描探针显微镜(SPM)。1982年,G. Binnig 和 H. Rohrer 发明扫描隧道显微镜(STM)。这种显微镜采用电子隧道效应原理,具有极高的测量分辨率,以至于可以描画出单个原子的图像。STM 的成功预示了近场效应在高分辨率的测量中具有重要的应用前景,并展现了一种全新的测量机制,即由一个探测针尖与被测表面在近场范围内发生作用,并检测这种作用。由压电陶瓷驱动器驱动探针或被测物体在空间做三维移动,使针尖与被测表面始终处于近场作用的范围内。近场作用是多种多样的,利用不同的近场作用参数就可构成不同的测量仪器,从而形成了一个至今仍在不断壮大的扫描探针显微镜(SPM)族,并应用于半导体工业测量领域^[19,20]。表 1.3 列出了几种常见的 SPM 的探测参数和水平分辨率。

表 1.3 几种常见的 SPM 的探测参数和水平分辨率

扫描探针显微镜(SPM)	缩写	探测参数	水平分辨率
扫描隧道显微镜	STM	电子隧道电流	< 0.2 nm
原子力显微镜	AFM	范德华力	< 0.2 nm
摩擦力显微镜	FFM	水平力	< 0.2 nm
扫描近场光学显微镜	SNOM	近场光学反射	< 25 nm
磁力显微镜	MFM	磁力	< 100 nm

扫描隧道显微镜(STM)和原子力显微镜(AFM)是线宽测量中常用的两种仪器,它们的分辨率远比其他方法如光学式、触针式、电容式和电子显微镜式方法制成的仪器的分辨率高得多。AFM 的分辨率与 STM 相比基本相同,不同的是 STM 只能观测导电样本,而 AFM 还可以观测非导电样本。AFM 具有对被测材料不敏感的优点,可以完成绝缘体和导体材料在纳米尺度上线宽的精确测量。它在水平和垂直方向上都能达到纳米级甚至亚纳米级的测量分辨率。

SPM 已经被应用于质量保证体系中(EN 29000/ISO 9000),其在微电子、计算机元器件、微机械、薄膜、微硬度、生物技术上越来越受到重视并正在迅速扩大其应用范围。欧共体已将扫描探针显微镜的标定作为其研究协作网的研究项目,并将 SPM 的用户和生产厂商组织起来,对国家计量院建立的纳米测量溯源系统及标定方法进行检验。其工作内容包含了纳米实验室及纳米仪器的建立,扫描探针显微镜的特性研究,纳米测量标准样板的制备以及标定方法的建立和校验等。

(4) 电学测量方法。以电桥法为代表的电学测量方法从 20 世纪 80 年代开始广泛应用于多晶硅和铝等导电膜的线宽测量。它通过测量截面的导电能力,即一般常用电桥测量原理来测量电阻值得到平均线宽^[21]。它具有较高的测量精度,能达到 $\pm 0.003 \mu\text{m}(3\sigma)$ 的重复性,并且测量速度比光学测量方法和 SEM 方法更快。D. Yen 等研究人员分别研究了电学方法的测量精度、不确定度等问题^[22-27]。

(5) 轮廓仪。触针轮廓仪在线宽测量中有时也会应用到。触针轮廓仪在单刻线测量方面是一种传统和可靠的方法,其垂直分辨率可达 1 nm,但由于触针尺寸较大所以很难得到高的水平分辨率^[28,29]。

(6) 其他测量方法。除了以上提及的一些测量仪器和方法外,还有一些研究者提出了新的测量方法和思想。例如,M. Miyoshi 所提出的线性衰减法^[30],NIST 的 R. M. Silver 和 C. P. Jensen 等人提出了一种通过计数原子个数来计算线宽的方法^[31]。

1.1.4 纳米线宽 (CD) 测量的研究现状

以美国国家标准与技术研究院(NIST)为代表的国外研究机构从 20 世纪六七十年代开始就在进行亚微米级的线宽测量研究工作。国际测量局所发起的纳米线宽测量比对工作就是由 NIST 牵头进行的。随着新的纳米测量仪器和研究方法的不断涌现,线宽测量在尺度和精度上不断挑战原有的测量极限。目前线宽测量研究工作相对集中在以下几方面。

(1) 测量仪器对图像的影响及线宽计算的方法。在纳米测量领域,测量尺寸和测量精度都在纳米级,测量原理和方法是重要的误差来源。目前常用的几种测量方法,无论是光学测量法、电子测量法还是探针测量法,测量图像都不能很好反映表面真实轮廓,因为光子、电子或者探针的物理尺寸都会造成图像的加宽,如图 1.4 所示。如何减小这种误差,目前还是一个研究难题。此外,探针对样本图像的影响不但使测量图像变宽,而且导致样本的线宽定义困难。

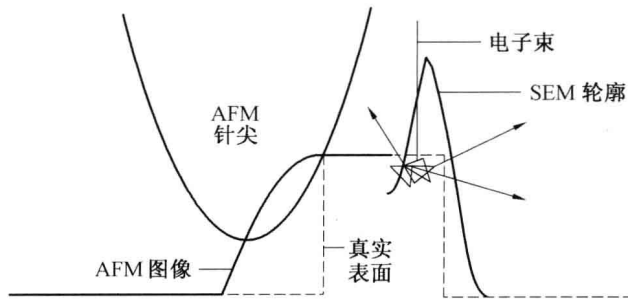


图 1.4 线宽的实际测量图像

针对不同的测量仪器,各国的科学家们做了大量的研究工作,试图消除测量工具的影响,准确检测线宽图像边缘,给出一个合理的线宽测量值。光学和 SEM 线宽测量都是通过线条剖面来进行的,这个剖面是由探测与样本相互作用的信号产生的。光学和 SEM 测量中广泛使用的方法是单阈值法。该方法中把线宽定义成以最大信号的给定百分比截得的信号间的距离。在光学测量中,阈值方法对边剖面、图形及其下面膜的厚度较敏感,并