



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Micro-nano Detection Technology

微纳检测技术

● 胡小唐 傅 星 刘庆纲 编著
李艳宁 胡晓东 郭 彤



 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

微纳检测技术

胡小唐 傅 星 刘庆纲 编著
李艳宁 胡晓东 郭 彤



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书系统地介绍了微纳检测领域常用的技术、方法及系统(仪器)。可作为信息领域研究生、本科生及中专学生的教材使用,也可作为微纳米研究领域科技工作者的参考书籍使用。本书共分8章,分别为微纳检测技术基础、光学干涉测试技术、微纳形貌检测技术、扫描探针显微镜、扫描电子显微镜、微纳坐标测量技术、微视觉测试技术和全息干涉技术。

图书在版编目(CIP)数据

微纳检测技术/胡小唐编著. —天津:天津大学出版社,
2009. 10

ISBN 978-7-5618-2863-2

I. 微… II. 胡… III. 微纳材料—应用—精密测量
IV. TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 181972 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
印 刷 昌黎太阳红彩色印刷有限责任公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 14. 25
字 数 360 千
版 次 2009 年 10 月第 1 版
印 次 2009 年 10 月第 1 次
印 数 1—2 000
定 价 26. 00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

18 世纪蒸汽机的发明带来了第一次产业革命——实现了机械化,可以称为蒸汽机时代;19 世纪电力的使用带来了第二次产业革命——实现了电气化,可以称为电力时代;20 世纪微电子和计算机的发明带来了第三次产业革命——实现了信息化、网络化,可以称为微电子和计算机时代;21 世纪纳米科技的兴起能否带来第四次产业革命? 21 世纪能否称为纳米科技时代?

从 Richard Feynman 对纳米技术的预言至今,纳米技术有了惊人的进步。微纳技术使材料、设备和系统的加工及制造产生了巨大的变化。在微纳米领域表现最为突出的是微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)和纳机电系统(Nano-Electro-Mechanical Systems, NEMS),由于它们优良的物理、化学和生物学特性,在信息技术、能源、航天和国家安全等领域得到了广泛应用。由于微机电系统的原理与传统机电系统的原理相同,因此可以应用经典理论进行研究;而纳机电系统的尺度达到纳米量级,经典理论已不适用。

微米科技是在 $0.1 \sim 5\,000\ \mu\text{m}$ 内,研究不同类型物质的运动和变化的学问。纳米科技是在 $0.1 \sim 100\ \text{nm}$ 内,研究原子、分子和其他类型物质的运动和变化的学问。

创造和制备优异性能的纳米材料,设计、制备各种纳米器件和装置,探测和分析纳米区域的性质和现象是纳米技术三个主要的研究方向。微纳米技术的发展,特别是微纳米尺度的加工和制造给测试技术提出了更高的要求。而测试技术的提高反过来又推动了微纳米科技的进步。

弗兰西斯·培根(Francis Bacon)提出了一个重要的哲学概念——实验是自然科学的基础。伽利略把这一哲学概念变成了可以实践的科学方法,并且提出了科学实验的两个基本要素:用科学仪器进行测量和用数字记录(表达)测量的结果,使实验的结果成为可以定量比较和精确计算的数据。可以这样说,近代自然科学是从真正意义上的测量开始的。在那个时代,杰出的科学家们许多都是科学仪器的发明家、新的测量方法的创立者。他们留给后世的科学遗产常常包括两个部分,一部分是科学探索的新发现,另一部分是在这种探索过程中创造的新的测量技术和仪器仪表。

本书着重研究微纳米尺度的测试技术及相应的测量仪器和系统。全书共分 8 章,第 1 章系统地介绍了微纳米量级检测技术的特点和常用的检测技术,另外对微纳米尺度的溯源与基准传递进行了描述;第 2 章介绍了光学干涉测试技术,包括位移干涉检测技术、相移干涉检测技术、X 射线干涉技术、激光多普勒测振技术、白光干涉检测技术、电子散斑检测技术以及其他光学干涉检测技术、仪器及应用;第 3 章介绍了微纳形貌检测技术,包括机械轮廓仪、光学轮廓仪和共焦显微镜技术、仪器及应用;第 4 章介绍了扫描探针显微镜技术,包括扫描隧道显微技术、原子力显微技术、磁扫描显微技术、热扫描显微技术、近场光学显微技术、其他扫描探针显微技术、仪器及应用;第 5 章介绍了扫描电子显微镜技术,包括扫描电子显微镜、透射电子显微镜、环境扫描电子显微镜等;第 6 章介绍了微纳坐标测量技术,包括微纳坐标测量技术基础、仪器及应用;第 7 章介绍了计算机微视觉测试技术,包括计算机视觉检测基础、数字图像处理技

术、运动参数的微视觉检测方法、常见仪器及应用;第8章介绍了微纳米技术研究领域常用的其他检测技术,包括数字全息技术、光学衍射显微镜技术、仪器及应用等。

本书主要由天津大学微纳测试与加工研究团队合作编写,其中收集了国内外该领域研究的最新进展和本团队研究的部分成果。本书第1章由胡小唐、傅星、李艳宁编写;第2章由胡晓东、郭彤编写;第3章由李艳宁编写;第4章、第5章由刘庆纲编写;第6章由傅星编写;第7章由胡晓东编写;第8章由郭彤编写。由于时间仓促,书中难免出现错误,敬请读者批评指正。

编 者

2008年11月于天津

目 录

第1章 微纳检测技术基础	(1)
1.1 微纳米量级检测技术特点	(1)
1.2 常用检测技术	(3)
1.3 微纳尺度的溯源与基准传递	(5)
第2章 光学干涉测试技术	(8)
2.1 位移干涉检测技术	(8)
2.2 相移干涉检测技术	(15)
2.3 X射线干涉技术	(36)
2.4 白光干涉检测技术	(39)
第3章 微纳形貌检测技术	(48)
3.1 接触式轮廓仪	(48)
3.2 非接触式轮廓仪——光学式轮廓仪	(55)
第4章 扫描探针显微镜	(62)
4.1 扫描隧道显微镜	(62)
4.2 原子力显微镜	(95)
4.3 扫描近场光学显微镜	(118)
第5章 扫描电子显微镜	(129)
5.1 扫描电子显微镜	(129)
5.2 透射电子显微镜	(142)
5.3 环境扫描电子显微镜	(146)
第6章 微纳坐标测量技术	(149)
6.1 微纳坐标测量技术基础	(149)
6.2 微纳坐标测量仪器	(156)
6.3 微纳坐标测量仪器的研究进展	(165)
6.4 微纳坐标测量仪器传感测头的研究进展	(171)
第7章 微视觉测试技术	(179)
7.1 微视觉测试技术基础	(179)
7.2 微结构平面尺寸的视觉测试	(183)
7.3 微结构平面运动参数的视觉测试	(186)
第8章 全息干涉技术	(209)
8.1 全息干涉技术的发展历史	(209)
8.2 全息图的分类	(209)
8.3 传统全息技术的基本原理	(210)
8.4 数字全息技术	(211)
8.5 商业化仪器介绍	(214)
参考文献	(217)

第1章 微纳检测技术基础

1.1 微纳米量级检测技术特点

科学技术向微小领域发展,由毫米级、微米级继而涉足到纳米级,即微/纳米技术。微/纳米技术研究和探测物质结构的功能尺寸与分辨能力达到微米至纳米级尺度,使人类在改造自然方面深入到原子、分子级的纳米层次。

一般认为,微米科技是在 $0.1 \sim 5\,000\ \mu\text{m}$ 内,研究不同类型物质的运动和变化的学问。纳米科技是在 $0.1 \sim 100\ \text{nm}$ 内,研究原子、分子和其他类型物质的运动和变化的学问。在研究微米科技时往往采用经典理论进行分析,例如经典的 Lagrangian 力学理论、Newton 力学理论和 Maxwell 电磁理论;而纳米科技的研究需要量子理论(图 1.1)。因此在研究微纳米量级的测试技术时可以从功能特征和结构尺寸两个角度开展研究。功能特征是指微纳米量级的器件、设备或系统所实现或期望实现的功能特征。例如功能器件的力学特征、电学特征、光学特征等等。结构尺寸是指整体尺寸为毫米量级,而精度为微、纳米量级的结构,或者整体尺寸就是微、纳米量级的结构。

微机电系统(MEMS)或微光机电系统(Micro Optic-Electro Mechanical Systems, MOEMS)技术是建立在微米纳米技术基础上的 21 世纪前沿技术,是指对微米/纳米材料进行设计、加工/制造、封装、测量/控制的技术。它可将机械构件、光学系统、驱动部件、电控系统集成为一个整体单元的微型系统。目前, MEMS 与集成电路发展的初期情况极为相似。集成电路发展的初期,其电路在今天看来是很简单的,应用也非常有限,以军事需求为主,但它的诱人前景吸引了人们进行大量投资,促进了集成电路飞速发展。当前 MEMS 能否取得更大突破,取决于两方面的因素:第一是在微系统理论与基础技术方面取得突破性进展,使人们依靠掌握的理论和基础技术可以高效地设计制造出所需的微系统;第二是找准应用突破口,扬长避短,以特别适合微系统应用的重大领域为目标进行研究,取得突破,从而带动微系统产业的发展。在 MEMS 发展中需要继续解决的问题主要有: MEMS 建模与设计方法学研究;三维微结构构造原理、方法、仿真及制造;微小尺度力学和热学研究; MEMS 的表征与计量方法学;纳结构与集成技术等。片上系统(System On a Chip)是 21 世纪微电子技术发展的重点。相类似的还有芯片实验室(Lab On a Chip)等。微电子与生物技术紧密结合诞生的以 DNA 芯片等为代表的生物芯片

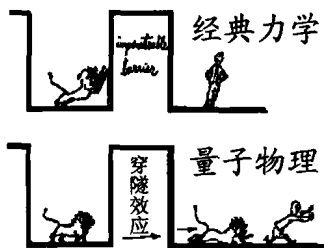


图 1.1 经典力学与量子物理

将是 21 世纪微电子领域的另一个热点和新的经济增长点。它是以生物科学为基础,利用生物体、生物组织或细胞等的特点和功能,设计构建具有预期性状的新物种或新品系,并与工程技术相结合进行加工生产,它是生命科学与技术科学相结合的产物。

科学家们在研究物质构成的过程中,发现在纳米尺度下隔离出来的几个、几十个可数原子或分子,显著地表现出许多新的特性,既不同于宏观物体,也不同于单个孤立原子的奇异现象,而利用这些特性制造具有特定功能设备的技术,并且在原子量级进行物质控制或操纵就称为纳米技术。纳米技术是建立在量子效应上的独特结构技术。虽然 21 世纪也进入生物工程时代和信息时代,但其技术关键都涉及量子效应。因此,纳米技术有可能引起计算机革命、光革命甚至生物工程革命。纳米技术正在向新材料、微电子、计算机、医学、航天、航空、环境、能源、生物技术和农业等诸多领域渗透,作为 21 世纪的一项关键技术,虽然目前应用研究尚不成熟,但其应用前景和市场潜力不可估量。而研究纳米技术的意义在于时代发展的需要、对客观世界认识的需要(如原子的尺度在 $0.1 \sim 0.25 \text{ nm}$ 范围,DNA 螺旋结构的尺度在 1 nm 范围等等)及产业的需要(如在材料方面纳米技术改变未来制作材料与装置的方法;在微电子方面对纳米级电子器件及系统的需求;生命系统系由纳米尺寸的分子行为所控制;在航空与太空探测方面飞行器的设计、制造及发展在地球上无法制造的纳米结构或系统;纳米科技在能源效率、储存及生产上具有潜在巨大的冲击;在生物科技与农业方面,生命的基本元素包括蛋白质、核酸、脂质、糖等,皆因其在纳米尺度上的大小、形态的不同具有独特的性质;在国家安全方面纳米电子技术提供各种持续信息)。因而从 1959 年 Feynman 关于纳米技术的设想开始,纳米技术便成为科学界关注的焦点;1981 年 Binning 发明了扫描隧道显微镜(Scanning Tunnel Microscope, STM);1990 年 IBM 实验室操纵原子获得成功;1999 年基于纳米产品的年营业额达到 500 亿美元。这些进步使得半导体芯片的体积更小、速度更快,把纳米级的半导体材料做成晶体管,从而可以让一块芯片上容纳更多的晶体管。这种芯片的运算速度可望比传统的硅芯片提高上千倍;在癌症诊断方面利用纳米技术制成的传感器可望使各种癌症的早期诊断成为现实;在光学新材料方面改变了某些半导体材料的分子结构,用来生产特定的光学器件;在生物分子追踪方面把某种纳米颗粒“黏”在生物分子上,然后利用纳米颗粒的发光特性研究生物分子的行踪。但纳米技术不同于微米技术,其研究的难点在于表面效应、小尺寸效应、量子尺寸效应等。纳米材料的表面效应是指纳米粒子的表面原子数与总原子数之比随粒径的变小而急剧增大后所引起的性质上的变化;小尺寸效应是指当体积极小,所包含的原子数很少,相应的质量极小时,许多现象就不能用通常有无限个原子的块状物质的性质加以说明,这种特殊的现象通常称之为体积效应;量子尺寸效应是指当粒子的尺寸达到纳米量级时,飞米级附近的电子能级由连续态分裂成分立能级,当能级间距大于热能、磁能、静电能、静磁能、光子能或超导态的凝聚能时,会出现纳米材料的量子效应,从而使其磁、光、声、热、电、超导电性能变化。纳机电系统(NEMS)的发展结合了微米纳米技术的特点,形成一类更具发展潜力的器件、设备或系统。

从制造工艺上讲有两种工艺原理:自下而上(Bottom-Up)和从上到下(Top-Down)。自下而上有两个含义:一是量子电子器件(Quantum Electron Device, QED),包括单电子器件和单电子存储器等,它的主要优点是集成度高,功耗极低,由于相对小的电容和电阻以及短的隧道穿透时间,所以速度很快,且可用于多值逻辑和超高频振荡;二是以原子分子自组装技术为基础的纳米电子学,包括量子点阵列和以碳纳米管为基础的原子的分子器件等,其基本优势是开关速度快、功耗低、集成密度高。从上到下是指从系统行为级开始设计。如 SOC 是从整个系统

的角度出发,把处理机制、模型算法、芯片结构、各层次电路直至器件的设计紧密结合起来,在单个(或少数几个)芯片上完成整个系统的功能,在同样的工艺技术条件下实现更高性能的系统指标。

目前,国际上比较重视的微机电系统的加工和制造技术有:硅加工工艺(牺牲层硅工艺、CMOS工艺)、超精加工工艺(体微切削加工)、LIGA(Lithography)工艺等。新的微型机械加工方法还在不断涌现,包括多晶硅的熔炼和声激光刻蚀等。而纳米级加工和制造工艺有:分子组装、SPM针尖刻蚀和电场诱导氧化、激光或X射线聚合等,但目前还主要集中在设计、建模、模拟及分子级结构的加工方面。

1.2 常用检测技术

微纳米技术的发展,离不开微米级和纳米级的测量技术与设备。测试测量的需求推动了测量技术和设备(系统)的发展,而测量技术和设备(系统)的发展又反过来促进了微纳米技术的进步。在测量技术和设备(系统)的发展过程中,涌现了种类繁多的技术和设备(系统),其中按工作场合可分为在线式和离线式;按测量方式可分为接触式和非接触式;按传感方式可分为电子式、热敏式、磁敏式、力敏式、光敏式等;按测量机理可分为溯源式和非溯源式;按工作原理可分为观测型和计量型;按测试参数可分为静态型和动态型。还有很多分类的方式,在此不一一叙述。

1.2.1 一维微纳米级长度尺寸测量

长度是基本物理量之一。在微纳测量领域多数参量的测量都可以通过长度的测量直接或间接获得。按国际计量标准,1 m 等于光在真空中 $1/299\,792\,458$ s 的时间间隔内所经过的距离。任何长度的测量都要求溯源到米的定义。

一维长度尺寸的测量主要采用激光干涉仪完成。如德国的 PTB 与 Heidenhain 公司合作研制的纳米比长仪在一维测长领域代表着世界领先水平,其测量范围达到 610 mm,测量不确定度为 5 nm。将激光干涉仪集成在比长仪上是纳米比长仪的关键技术之一。

1.2.2 二维微纳米级平面测量

与一维微纳米级长度尺寸测量相比,其引用的关键技术除了上述的激光测长和瞄准定位外,还需要考虑进行二维测量的平面参考镜的制造、测量和安装调整。平面参考镜的直线度、平面度和两个平面镜的正交性是主要的测量误差来源。为使工作台运动的直线度满足测量要求,平面反射镜的平面度和 X、Y 两个方向的垂直度必须分别控制在足够小的范围内。测量系统采用高精度的激光干涉仪测量 X、Y 位置,激光束垂直交叉通过被测件的表面消除阿贝误差。如瑞士 METAS 研制的掩模板测量仪测量范围达到 400 mm × 300 mm。该仪器由具有空气轴承的 X、Y 位移台组成,两轴的平面反射镜干涉仪测量位移台的位置,用数字视频显微镜系统瞄准定位,对于短周期的测量重复性小于 3 nm。

1.2.3 三维微纳米级空间测量

三维微纳米级空间测量的主要代表性技术是微纳坐标测量技术,代表性的设备或系统是微型坐标测量机和纳米坐标测量机。与一维和二维测量相比,其主要考虑在 X 、 Y 、 Z 三个方向平面参考镜的直线度、平面度和三个平面镜的正交性,三个方向的激光束垂直正交于一点,并与测头针尖重合,消除阿贝误差。如德国 SIOS 的 NMM—1 纳米定位与测量机,用精密加工的立方角镜构成运动平台, X 、 Y 、 Z 三个方向用三台平面镜干涉仪测量平台位移,三个激光光束交于一点并与测头针尖重合,由直线电机驱动平台在三个方向运动。其定位测量范围为 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,分辨力为 0.1 nm 。

1.2.4 常用检测技术概述

在已发展的测量设备(系统)中,有些由于测量范围大但精度不高,仅适用于微米量级的测量;有些由于精度高但测量范围小,仅适用于纳米量级的测量;有些则测量范围大精度又高,既适用于微米量级的测量,又适用于纳米量级的测量。这些设备(系统)中,有些仅能实现一维长度的测量;有些既能实现一维长度测量,又能实现二维平面测量;有些则既能实现一维长度测量,又能实现二维平面测量,还能实现三维空间测量。在微纳领域,测量技术和设备(系统)的发展趋势是研究三维空间测量技术,建立三维空间测量并具有溯源功能的系统,测量范围达到几十至几百毫米,分辨力优于 0.1 nm ,测量不确定度为几个纳米。

常用的检测技术及仪器概述如下。

(1)激光干涉技术及仪器:通过被测物体位置变化引起激光干涉条纹的变化来获得位移信息,实现位移、长度等的测量。属具有溯源功能的计量型仪器,可以在线或离线应用,适用于微纳米量级的一维长度测量。

(2)扫描探针显微术及仪器:通过探针和被测样品表面的相互作用来获得被测样品表面相关的信息,实现表面形貌、物理参数等的测量。属离线式、观测型仪器,适用于纳米量级的一维、二维和准三维测量。主要仪器包括 STM、AFM(原子力显微镜,Atomic Force Microscope)等。

(3)扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM):通过电子束对被测样品表面扫描时,样品表面反射电子的程度获得被测样品表面相关的信息,实现表面形貌的测量。属离线式、观测型仪器,适用于微纳米量级的一维、二维和准三维测量。

(4)透射电子显微镜(Transmission Electron Microscope, TEM):通过电子束对被测样品表面扫描时,样品对电子束吸收的程度来获得被测样品表面相关的信息,实现表面形貌、物理参数等的测量。属离线式、观测型仪器,适用于微纳米量级的一维、二维和准三维测量。

(5)共焦激光扫描显微镜(Confocal Laser Scanning Microscope, CLSM):激光利用精密共焦空间滤波形成物像共轭,聚焦光束对被测样品扫描获得光学断层图像,不同焦平面的光学切片经三维重构后得到样品的三维立体结构。属离线式、观测型仪器,适用于微纳米量级的三维空间测量。

(6)微纳坐标测量技术及仪器:通过运动平台带动被测样品表面产生与测头之间的相对运动,经测头瞄准定位来获得被测样品表面坐标信息,实现表面形貌、结构参数等的测量。属离线式、计量型仪器,适用于纳米量级的一维、二维和三维测量。

(7)模糊图像处理技术:通过 CCD 探测被测样品微结构的运动图像(模糊图像)信息,利用图像处理算法获得被测样品的运动频率、幅度、相位等信息,实现微结构的运动参数测量。可以用于在线或离线测量,适用于微米量级的二维测量。

(8)频闪图像处理技术:通过被测样品微结构周期运动的单点“冻结”,得到被测样品的某个运动时刻的清晰图像,经重构得到整个周期的连续数据,包括运动频率、幅度、相位等信息,实现微结构的运动参数测量。可以用于在线或离线测量,适用于微米量级的二维测量。

(9)图像干涉测试技术:通过对被测样品微结构运动引起的干涉条纹的变化,得到被测样品的运动频率、幅度、相位等信息,实现微结构的运动参数测量。可以用于在线或离线测量,适用于微米量级的一维、二维和三维测量。

(10)激光多普勒测试技术:通过被测样品微结构不同位置运动速度的差异,得到被测样品的某个位置运动频率、幅度、相位等信息,实现微结构的运动参数测量。可以用于在线或离线测量,适用于微米量级的一维测量。

(11)激光散斑测量技术:通过对被测样品微结构对激光光斑的影响,得到被测样品的表面变化等信息,实现微结构参数的测量。它克服了以往算法对被测表面要求较高的缺点,提高了适应性。可以用于在线或离线测量,适用于微米量级的二维测量。

(12)光流场测试技术:通过被测样品微结构对光流场的作用,得到被测样品的表面变化及运动参数。提高匹配速度和精度,将原来需要多次运算的结果仅计算一次得出。可以用于在线或离线测量,适用于微米量级的二维测量。

其他测试技术及仪器还有阵列测试技术、电子探针 X 射线显微分析仪(Electron Probe X-ray Microanalyzer, EPMA)等。

1.3 微纳尺度的溯源与基准传递

量值的溯源性是指通过一条具有规定不确定度的不间断的比较链,使测量结果或测量标准的值能够与规定的参考标准(通常是国家计量标准或国际计量标准)联系起来的特性。这种特性使所有的同种量值,都可以按这条比较链通过校准向测量的源头追溯,这样才能确保量值的准确性、可靠性、可比性和可重复性。要保证微纳米尺度测量的准确性,必须借助必要的量值溯源过程。本节将对微纳米尺度溯源体系及其相关内容进行阐述。

1. 微纳米尺度溯源体系

图 1.2 为微纳米尺度溯源体系,最高长度基准是以 $0.633\ \mu\text{m}$ 激光波长为参考的国际米定义。首先由测量准确度较低的实验室中使用的各种微纳米测量器具与上一级计量标准器具测量结果相比较,追溯至计量标准器具,然后再将计量标准器具测量结果和更高一级的微纳米实物基准量值进行比较,由此再追溯到微纳米尺度标准三维检定装置,最后到准确度最高的国际米定义,这样就完成了量值的溯源过程。从微纳米尺度溯源体系图中可以看出,实物基准及其三维检定装置是实现微纳米尺度溯源的关键。

2. 微纳米尺度实物基准

我们知道,半导体集成电路技术、镀层厚度、微粉材料、微细胞结构以及微光机电系统(MOEMS)等尺寸的测量离不开二维测量仪器。目前这方面的测量仪器主要有扫描探针显微

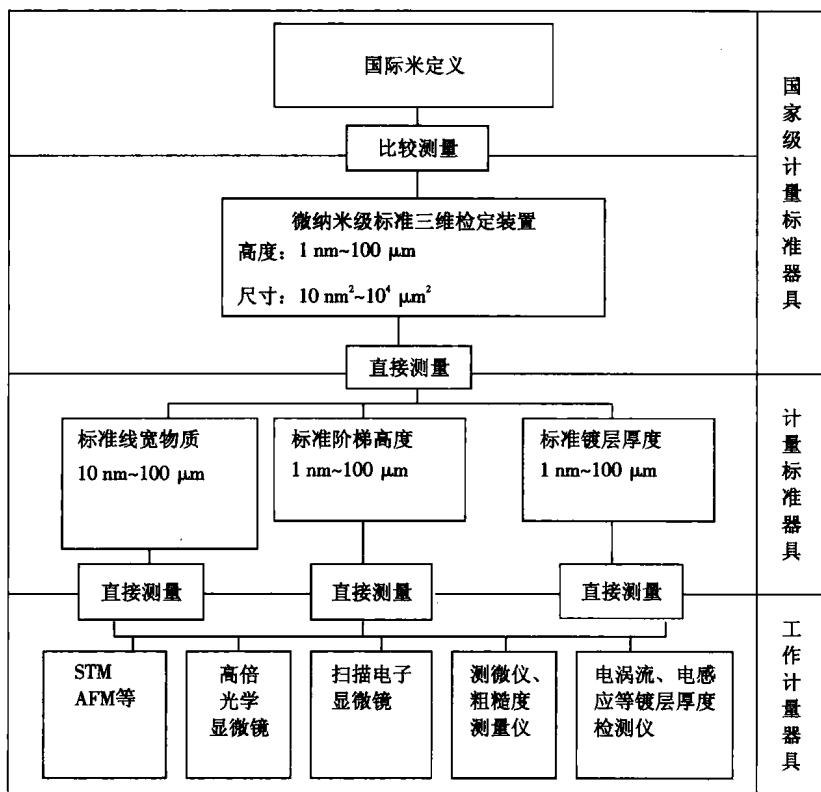


图 1.2 微纳米尺度溯源体系

镜 SPM 家族(扫描隧道显微镜 STM,原子力显微镜 AFM),近场扫描光学显微镜 SNOM(Scanning Near-field Optical Microscope)及用于半导体线宽和微形状、微结构测量的高放大倍数的光学显微镜和扫描电子显微镜,镀层厚度测量用的电涡流、电感应、电磁场等各种镀层测量仪器 and 各类测微仪、透射电子显微镜等等。这些测量仪器分别是由标准线宽、标准镀层厚度片以及标准阶梯高度等标准参考物质校准的,这些标准参考物质也叫实物基准。如美国 NIST(National Institute of Standards and Technology,国家标准技术研究院)标准台阶,台阶高度 1 899 nm、不确定度 ± 2 nm、台阶不均匀性 ± 0.5 nm;美国 NIST 用于标定光学显微镜线宽测量系统及扫描电镜放大倍数的亮铬线宽标准 SRM476、增透铬宽标准 SRM475 以及增透铬线宽标准 SRM473 等;德国 0.8 μm 线宽标准;美国标准镀层厚度片,厚度层在 2 nm~200 nm 不等。

3. 微纳米尺度计量装置

考虑到精度、分辨力、测量范围等因素以及技术成熟程度,微纳米级精度尺寸标准的三维检定装置可选计量型 AFM,如图 1.3 所示。它一般包括扫描单元和尺度计量单元。扫描单元一般选用三维压电陶瓷驱动型,而尺度计量单元选择三个激光干涉仪分别测量 X 、 Y 、 Z 三个方向上的位移,能把量值直准。使用该计量装置向上可把量值溯源到光波波长,与米定义保持溯源性;向下可对比标准线宽、标准镀层厚度片以及标准阶梯高度进行标定以实现微纳尺度基准传递。

这里,计量型 AFM 一方面用于亚纳米级定位和扫描,从而实现 X 、 Y 二维尺寸测量。另一方面,AFM 的反馈电压(Z 轴方面)作为 Z 方向的数据信息,加上 X 、 Y 、 Z 三个方向上的高分辨

力的激光干涉仪直接测量探针的位移,整套装置就可以实现对三维微纳米结构的精确测量。

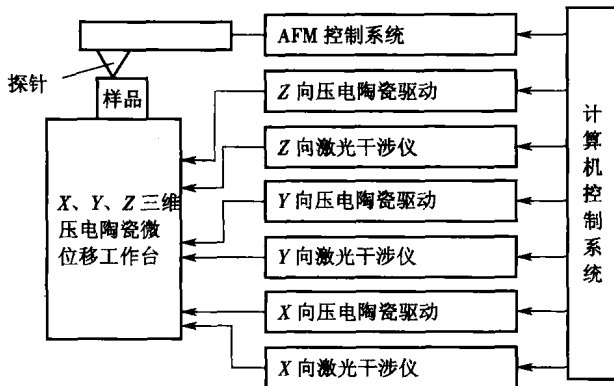


图 1.3 纳米级尺度标准的三维检定装置原理框图

典型的计量型 AFM 是德国 SIOS 公司的微纳米测量与定位系统(纳米测量机)。关于纳米测量机在其他章节中有详细介绍,这里不再赘述。

思考题

- [1] 简述微纳米尺度的溯源体系。
- [2] 描述基于计量型 AFM 的纳米尺度三维检定装置工作原理。

第2章 光学干涉测试技术

2.1 位移干涉检测技术

2.1.1 概述

干涉测量技术是以光波干涉原理为基础的一门技术,与其他测量技术相比,它具有非接触、高灵敏度和高准确度的优点,因而在机械量测量、流体测速仪、测振仪及生物运动监测等领域得到了广泛应用。特别是1960年由梅曼(Maiman)研制成功世界上第一台红宝石固体激光器以来,随着光电技术、信号处理技术及计算机技术等的发展,干涉测量技术的测量范围、测量分辨力和准确度也得到了极大提高,目前该技术已经向纳米、亚纳米级分辨力的方向迈进。

激光是一种高亮度的定向能束,与普通光源相比,它具有单色性好、相干性强、方向性好和高亮度等特点,这些特点是普通光源发出的光所无法达到的。目前以He-Ne激光器作为光源的激光干涉法已成为一种经典的长度计量方法。激光干涉仪是通过激光干涉信号与测量镜位移之间的对应关系来测量位移的。目前应用的激光干涉仪测量技术主要是基于迈克耳孙干涉的单频激光干涉仪或双频激光干涉仪。

激光干涉仪具有以下特点。

(1)它以激光在真空中的波长为长度基准,可以实现高精度和高分辨力的测量。但在实际测量过程中,激光束在空气中通过时,其波长因受到大气的压力、温度和湿度等环境参数的影响而发生变化,从而影响到测量精度。因此,利用激光干涉仪测量时需要严格控制外界条件。

(2)可以实现非接触测量,容易安装和对准,而且易于消除阿贝(Abbe)误差。

(3)利用平面镜干涉仪,很容易进行多个自由度方向上位移的同时测量,如可以同时进行 X 、 Y 、 θ 方向上的测量。

(4)可以测量多种几何量,如位移、角度、垂直度、平行度以及直线度、平面度等。

(5)可以测量空气折射率的变化。

激光干涉测量系统主要由激光器、各种光学元件、信号处理元件及控制元件等组成。当前激光干涉仪的发展已经出现了以下一些特点。

(1)高分辨力。如今激光干涉仪的分辨力已经可以达到 $\lambda/4096$ (λ 为激光光源波长)。

(2)高速。激光干涉仪可以测量的最大允许速度在不断提高。

(3)光纤优势。在激光干涉仪中利用光纤来传输激光,激光头可以远距离安装,能够消除

潜在的热源;同时,可以减小激光受外界温度、湿度、大气压变化的影响,从而提高测量精度。

(4)测量电路集成化程度提高。随着测量电路集成化程度的提高,测量电路处理信号的速度也在提高,使得系统的响应时间达到0.1 ns。

2.1.2 激光干涉测量技术原理

激光干涉测量技术的基础是光波的叠加原理。若空间中的两列光波满足如下相干条件,则两列光波叠加后即可形成稳定的干涉条纹:

- (1)两列光波频率相同;
- (2)两列光波振动方向相同;
- (3)两列光波具有恒定的相位差。

激光器因为其发光方式主要为受激辐射,同一原子先后辐射的各波列之间,以及空间上不同原子辐射的各波列之间都具有确定的相位关系,因此激光器具有很好的相干性,用激光作光源时可以在很大的光程差下还能得到干涉条纹。

当空间中存在两列相干光时,设其中一列的光强为 I_1 ,另一列的光强为 I_2 ,则两光波叠加后的光强 I 满足如下公式

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (2.1)$$

式中, δ 为两光波在空间某点相遇时的相位差。由式(2.1)可以看出,两光波在空间某点叠加后的光强与两光波的相位差有关,当 $\delta = \pm 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi \cdots$ 时, $\cos \delta = 1$,此时叠加后的光强最大(干涉加强);当 $\delta = \pm \pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi \cdots$ 时, $\cos \delta = -1$,叠加后的光强最小(干涉减弱)。

相位差 δ 与光程差的关系为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L \quad (2.2)$$

式中, ΔL 为两光波在空间某点处的光程差。从式(2.2)可知当两光波在空间某点处的光程差 $\Delta L = m\lambda$ 时(m 为整数),叠加后光强最大,形成亮纹;当 $\Delta L = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$ 时,叠加后光强最小,形成暗纹。亮纹和暗纹交替出现即形成稳定的干涉条纹。

1. 迈克耳孙干涉仪

迈克耳孙干涉仪是一种典型的单频双光束干涉仪,它很好地解释了光波干涉的特性,成为后来诸多干涉仪发展的基础。迈克耳孙干涉仪的仪器结构如图2.1所示。

2. 激光外差干涉测试技术

单频激光干涉仪的光强信号及光电转换器件输出的电信号都是直流量,直流漂移是影响测量准确度的重要原因,信号处理及细分都比较困难。为了提高光学干涉测量的准确度,20世纪70年代起有人将电通信的外差技术移植到光学干涉测量领域,发展了一种新型的光外差干涉技术。光外差干涉是指两个相干光束的光波频率之间一个小的频率差,引起干涉场中干涉条纹的不断扫描,经光电探测器将干涉场中的光信号转换为电信号,由电路和计算机检出干涉场的相位差。该方法不仅克服了单频干涉仪的漂移问题,而且使细分变得容易,并提高了抗干扰性能,无论在几何量测量,还是干涉测波差以及其他物理量测量等方面均得到成功的应用。

1) 外差干涉技术原理

设测量光路和参考光路的光波频率分别为 ω 和 $\omega + \Delta\omega$,则干涉场的瞬时光强为

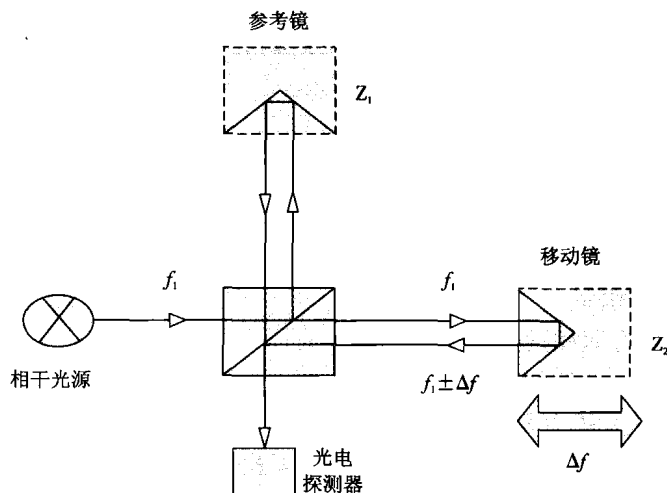


图 2.1 迈克耳孙干涉仪的结构

$$\begin{aligned}
 I(x, y, t) &= \{ E_r \cos(\omega + \Delta\omega)t + E_t \cos[\omega t + \varphi(x, y)] \}^2 \\
 &= \frac{1}{2} E_r^2 [1 + \cos 2(\omega + \Delta\omega)t] + \frac{1}{2} E_t^2 \{ 1 + \cos 2[\omega t + \varphi(x, y)] \} \\
 &\quad + E_r E_t \cos[(2\omega + \Delta\omega)t + \varphi(x, y)] \\
 &\quad + E_r E_t \cos[\Delta\omega t - \varphi(x, y)]
 \end{aligned}$$

由于光电探测器的频率响应范围远远低于光频 ω ，它不能跟随光频变化，所以上式中含有 2ω 的交变项对探测器的输出响应无贡献。故探测器的输出为

$$I(x, y, t) \propto E_r^2/2 + E_t^2/2 + E_r E_t \cos[\Delta\omega t - \varphi(x, y)] \quad (2.3)$$

上式表明，干涉场中某点光强以低频 $\Delta\omega$ 随时间呈余弦变化。如图 2.2 所示，放入两个探测器，一个放在基准点 (x_0, y_0) 处，称之为基准探测器，其输出基准信号为 $i(x_0, y_0, t)$ ，另一个放在干涉场某探测点 (x_i, y_i) 处，称之为扫描探测器，输出信号为 $i(x_i, y_i, t)$ ，将两个信号相比，测出信号的过零时间差 Δt ，便可知道二者的光学相位差为

$$\varphi(x_i, y_i) - \varphi(x_0, y_0) = \Delta\omega \Delta t = 2\pi \Delta t / (1/\Delta\nu) \quad (2.4)$$

则由控制系统控制扫描探测器对整个干涉场扫描，就可以测出干涉场各点的相位差。

2) 激光外差干涉仪的光源

常用的双频激光光源有纵向塞曼与横向塞曼 He-Ne 激光器、双纵模激光器和各种原理的移频双频光源。

(1) 塞曼效应 He-Ne 激光器。

当原子被置于弱磁场中时，其能级发生塞曼分裂，因而其辐射和吸收谱线也产生相应分裂，一条谱线被几条塞曼谱线代替，这些谱线和原谱线有不大的频差。

m 为磁量子数，对于 $\Delta m = 0$ 的跃迁产生 π 偏振光，对于 $\Delta m = \pm 1$ 的跃迁分别产生 σ_+ 和 σ_- 偏振光。 π 偏振光和分裂前的中心频率相等， σ_+ 和 σ_- 偏振光和原中心频率之差为

$$\Delta\nu_z = 1.30 \frac{\mu_B}{h} H \quad (2.5)$$

式中： μ_B 为玻尔磁子； h 为普朗克常数； H 为磁场强度。

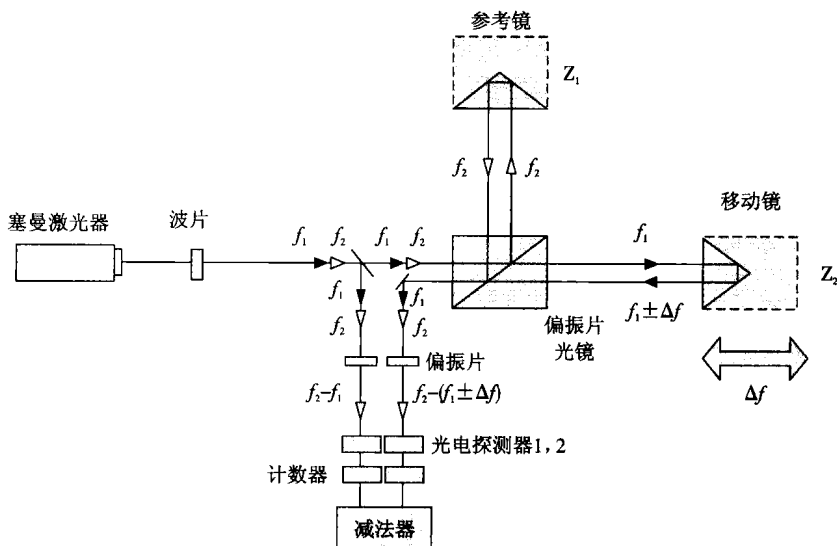


图 2.2 外差激光干涉仪的结构

根据 He-Ne 激光器光辐射方向和外磁场方向的关系,可以构成纵向塞曼激光器和横向塞曼激光器。当所加磁场和光辐射方向一致时,迎光线方向观察到 σ_+ 和 σ_- 偏振光为左、右旋圆偏振光,而观察不到振动方向平行于光传播方向的 π 偏振光,称为纵向塞曼激光器。当所加磁场垂直于光辐射方向时,迎光线方向观察到 π 偏振光是平行于磁场的线偏振光, σ_+ 和 σ_- 偏振光是垂直于磁场的线偏振光,称为横向塞曼激光器。

纵向塞曼激光器辐射的左、右旋圆偏振光由于介质的频率牵引效应,产生一定的频差。如果采取稳频措施,以两频率的光强相等为稳频依据,则激光器辐射 ν_1 和 ν_2 频率的左、右旋圆偏振光。当磁场强度约为 0.03 T 时,可得到 1~2 MHz 的频差。

(2) 双纵模 He-Ne 激光器。

激光器谐振腔的选频作用可以得到模间隔为 $\Delta\nu_L = c/2nL$ 的一系列纵模,选择并控制腔长可以得到较大功率的双纵模。例如选用 250 mm 长的 He-Ne 激光器,可以得到频差约为 600 MHz 的双频激光,以两者光强相等为稳频条件,两频率对称于中心频率,幅值和中心幅值相差不大,可用于外差干涉仪。但是由于频差太大,不利于光电检测和信号处理,需要和稳定的本机振荡信号混频,取其差频进行计数和鉴相。另外它可以为测距提供合成波长。

(3) 光学机械移频。

当干涉仪中的参考镜以匀速 v 沿着光轴方向移动时,垂直入射的反射光将产生 $\Delta\nu = 2v/\lambda$ 的频移。

如果圆偏振光通过一个旋转中的半波片,则透射光将产生两倍于半波片旋转频率 f 的频移,即 $\Delta\nu = 2f$ 。在参考光路中放入一个固定的 $1/4$ 波片和一旋转的 $1/4$ 波片,如果固定 $1/4$ 波片的主方向定位合适,它可以把入射的线偏振光转变为圆偏振光,该圆偏振光两次穿过旋转的 $1/4$ 波片,使其产生 $2f$ 的频移。圆偏振光再次穿过固定 $1/4$ 波片后又恢复为线偏振光,但频率已发生了 $\Delta\nu = 2f$ 的偏移。

垂直于入射光束方向移动(匀速)光栅的方法也可以使通过光栅的第 n 级衍射光产生 $\Delta\nu = nvf$ 的频移,此处 f 是光栅的空间频率, v 是光栅移动速度。