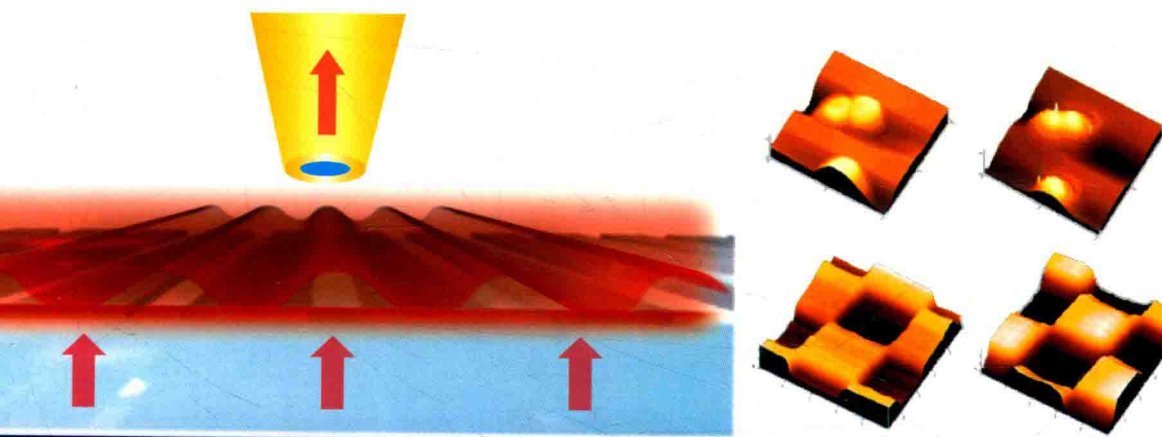


“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

扫描近场光学显微镜 与纳米光学测量

王 佳 武晓宇 孙 琳 编著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

扫描近场光学显微镜 与纳米光学测量

王 佳 武晓宇 孙 琳 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

扫描近场光学显微镜能够突破光学衍射极限实现超分辨成像,因此成为纳米光学测量中最重要的工具之一。本书首先对近场光学的基本概念和探测原理进行概述,然后对近场光学显微镜的分类、工作原理、功能模块、关键技术、性能指标等进行阐述。纳米光学测量在纳米光子学和等离激元光学研究中有诸多重要的应用,包括近场光学超分辨成像、纳米尺度光场振幅、相位、矢量场、磁场、偏振、光谱等物理参数的测量表征。本书还介绍纳米光学测量的新原理和新方法,并针对纳米光学、等离激元光学研究中的实验测量问题引用了国内外大量最新研究成果和实例,阐述了应用前景。

本书可供物理、光学等相关专业的高年级本科生和研究生阅读,也可作为从事近场光学、纳米光子学、等离激元光学等领域研究的科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

扫描近场光学显微镜与纳米光学测量 / 王佳, 武晓宇, 孙琳编著. —北京: 科学出版社, 2016

(光学与光子学丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-048799-5

I. ①扫… II. ①王… ②武…③孙… III. ①纳米技术-应用-光学测量-研究 IV. ①TB96

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第132932号

责任编辑: 钱俊 裴威 / 责任校对: 钟洋

责任印制: 张伟 / 封面设计: 铭轩堂设计

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年7月第一版 开本: 720×1000 B5

2016年7月第一次印刷 印张: 33 1/2

字数: 645 000

定价: 198.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛 书 序

长期以来，我一直想组织同行出一套适合于光学、光学工程工作者和研究人员需求的光学与光子学的丛书。如今，在科学出版社同志们的努力推进和工作在光学和光子学科研、教学一线的广大专家们的大力支持下，这样一个愿望终于得以实现，这使我感到由衷的欣慰和喜悦，我深信这样一套丛书的出版必将有效地促进我国光学、光电子以及光学工程技术的创新发展。

当今世界科学技术发展日新月异。科技创新能力已成为一个地区、一个国家，尤其是一个大国经济和社会发展的核心竞争力。在众多纷繁的科技领域中，光学与光子学的发展直接影响到其他诸多学科领域的发展及其可能取得的成就。不但物理学、化学、生命科学、天文学等基础科学的发展离不开光学与光子学，对现代人类生活和人类生活影响甚大的一些技术科学如照明、通信、洁净能源、遥感、显示、环境监测、国防和空间开发、医疗与诊断、先进制造等都需要光学与光子学的知识。光学与光子学是渗透到各个学科领域内的前沿科学，光学与光子学涉及到几乎所有技术前沿的核心技术。中华民族要真正走向繁荣昌盛离不开对光的驾驭。

编委会把丛书的名称定为《光学与光子学丛书》，是想以此既包含经典光学（classical optics）的精华，也容纳现代光学（modern optics）即光子学（photonics）的最新研究进展。我和所有编委们一同期期待着这套丛书能够在涉及光科学和光学技术知识的深度和广度上都达到一个崭新的高度。积跬步至千里，汇小溪成江河。改革开放三十年的成就使得我国的光学事业处在了一个新的起点上。让我们大家共同努力，以此套高质量、高水准的《光学与光子学丛书》作为对中国光学事业大发展的鼎力贡献。

母国光

2011年1月

前 言

1959年美国物理学家 Richard P. Feynman 曾发表了著名的演说“在底层还有许多空间(There is plenty of room at the bottom)”，被誉为“纳米科学的开山之作”。Feynman 在演讲中指出，如果人们将 $1\mu\text{m}$ 的长度分割成纳米的片断，即 $1/10^9\text{m}$ ，人们能够想象有多少片断和多少空间是能够进行操作的？经典光学和量子光学能够解释从宇宙到光子的物理现象，但是处于纳米尺度（国际上定义为 $1\sim 100\text{nm}$ ），即介观尺度却是空白。近场光学和纳米光学的发展正好填补了这个空白。当光与物质的相互作用进入纳米尺度时，产生了许多人们意想不到的奇异现象。后来科学的发展充分证明了费曼的论断是多么富于科学的洞察力。它不仅引起了科学家极大的兴趣和关注，而且引发了人们对纳米科学技术发展前景的希望和憧憬。

人们总想看清楚更小更细微的物体，光学显微镜是最好的工具。但是当进入纳米领域，由于受到衍射极限的限制，传统光学显微镜难以胜任。长期以来，突破光学衍射极限是科学家面临的挑战，实现超光学分辨成像是科学家的梦想。近场光学方法的出现和发展不仅突破了光学衍射极限，而且实现了超衍射分辨率的光学成像，更为科学家揭示纳米尺度上认识光与物质的相互作用机理提供了一项全新的技术。

近场光学(near-field optics)是相对传统光学、远场光学(far-field optics)而言的。纳米光学(nano-optics)则是研究纳米尺度光的物理现象。纳米光子学(nano-photonics)更多强调与纳米光子学器件有关。近场光学和纳米光学研究在纳米尺度下被约束在物体表面波长距离内的光学现象及纳米尺度下光与物质的相互作用，是新型交叉学科。研究对象包括隐失光场、局域光场，基于隐失场的探测实现超衍射极限分辨光学成像等，进而发展探测、表征、操作纳米光场的方法和技术。

在传统光学中，光学衍射极限效应服从阿贝原理。这一原理是 1873 年，德国科学家阿贝 (E. Abbe) 根据衍射理论首次推导出衍射分辨极限，即能够被光学分辨的最小细节总是大于波长的一半^[1]。瑞利(L.Rayleigh)在阿贝原理的基础上，推导出人们熟知的瑞利判据 (Rayleigh criterion)，如下述的公式^[2]

$$\delta \geq \frac{0.61\lambda}{n \sin \theta} \quad (1)$$

其中, δ 为分辨率, λ 为照明光波长, n 为物方折射率, θ 为物方半孔径角, $n \sin \theta$ 为数值孔径 (numerical aperture, N.A.)。传统光学显微镜系统的放大倍率是不能任意增大的, 其光学分辨率受到衍射极限的限制。根据瑞利判据, 由于衍射效应, 传统光学显微镜分辨率不会超过照明光波长的一半。例如, 使用波长 500nm 左右的黄绿色光源, 光学分辨率不会超过 250nm。由瑞利判据可知, 提高分辨率的方法包括: 短波长光照明, 如紫外线、极紫外、X 射线等; 提高物方折射率, 如高折射率介质材料, 选用高折射率油加在显微物镜和样品之间构成油浸物镜; 增加显微物镜的半孔径角 θ 。所有这些方法都为人们所熟知。尽管通过这些手段在一定程度上能提高成像分辨率, 但传统的光学显微镜还是无法突破光学衍射极限。

突破光学衍射极限是科学家始终不渝的追求目标。1928 年, E. H. Syngé 提出了近场成像的概念^[3], 其原理如图 1 所示, 主要包括四个部分: ①在不透明的平板或薄膜上制备一个尺度远小于入射光波长的小孔, 使得入射光只能从小孔透射; ②控制待测样品与小孔的间距在近场范围内, 如 10-20nm; ③入射光通过小孔照明样品, 透过样品的光通过显微镜聚焦到探测器上; ④对样品表面以栅格化方式扫描, 这样就克服了衍射极限, 从而获得超高光学分辨率的图像。理论上, 这种成像方法是完全可行的, 且分辨率可以达到 10 nm 甚至更高, 这就是最早提出的扫描近场光学显微镜 (scanning near-field optical microscopy, SNOM, 也称为 near-field scanning optical microscopy, NSOM) 的雏形。但实现这个物理模型的构想, 需要解决上述每一部分对应的技术难题。首先, 小于照明波长的小孔的制作对于当时的研究条件是难以逾越的技术障碍; 其次, 如何将待测样品与小孔之间的间距精确控制在近场作用范围也是难题; 第三, 通过小孔照射到待测样品的光功率密度足够大, 使得探测设备能够响应; 最后, 实现栅格化方式扫描的纳米量级步距操作起来也是有相当的难度。虽然由于当时技术条件的限制, Syngé 的构想未能实现, 但是 Syngé 提出的概念设计开启了近场光学测量思维的大门。

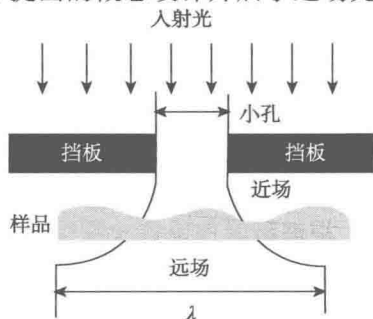


图 1 近场光学成像的概念设计

经过了将近 60 年的发展,这些制约 Syngge 构想实现的技术难题逐一被攻克。1960 年激光器的发明满足了这一设想提出的对光源的要求;1982 年扫描隧道显微镜的发明^[4]使亚纳米间距的精确测控和纳米步距扫描技术走向成熟;1984 年 IBM 苏黎世实验室的 D.W.Pohl 和 1986 年美国康奈尔大学的 A.Lewis 等各自独立研制成功了近场光学显微镜^[5,6],都在可见光波段成功实现了当初 Syngge 的构想,得到了光学超衍射分辨率图像。从此近场光学测量和表征的研究进入了一个全新的发展时期。

近场光学和纳米光学的诞生使光学学科从“远场”(far-field)进入到“近场”(near-field),从远大于波长的尺度进入到“纳米”和“亚波长”尺度,甚至量子尺度。不仅需要考虑光与物质、光与纳米结构的相互作用,甚至需要考虑光的量子效应。这不仅仅是尺度的变化,而是革命性的变化。纳米光学不仅与隐失波(evanescent wave)的产生,非传播场与传播场的转换,局域光场的激发、传播、增强、探测等相关,同时还与纳米尺度下电磁场能量传播与空间分布调控、纳米光场相位调控、光场局域、局域增强、光场变换等相关。这方面的研究涉及了更基本的物理学基本原理和方法。

基于近场光学原理能够实现超衍射分辨率光学成像的探测仪器系统成为不可或缺的重要工具,包括扫描近场光学显微镜、近场光谱测量系统、近场光学参数检测和表征仪器等。

近年来,近场光学和近场光学显微镜测量技术已经从超分辨光学成像发展到近场光学光谱、纳米光场多物理量测量和表征。同时,近场光学测量的发展从 20 世纪 80 年代开始已经引起了国际学术界和产业界的极大关注,出现了商品测量系统。在国内很多科学家的鼓励和支持下,很多年轻的科学工作者的积极加入,他们的创造性的科研成果对这一新兴领域产生极大的推动。

近场光学和纳米光学经过二十多年的发展,已经被广泛应用于多个领域,包括:物理、化学、生命科学、材料科学、信息存储、通信、新型光学器件和仪器等。在超衍射分辨成像、超高密度光学存储、纳米光学传感器、纳米光子学功能器件和回路、纳米光谱等很多领域取得了众多重要成果和进展。

国内外已经出版多部介绍近场光学的专著。但是,尚未发现专门介绍近场光学测量和纳米光学测量的专著。编写本书的最初动机是试图使读者通过阅读本书能够建立近场光学的基本概念,了解近场光学测量方法和测量系统,将近场光学的测量技术运用到相关研究领域,推动纳米光学的创新性研究。

本书集中介绍近场光学显微镜和近场光学测量原理、测量系统、纳米光场多物理量测量、近场光学测量在纳米光子学和等离激元光学研究中的应用。书中除了介绍近场光学的理论和近场光学显微镜测量成像系统之外,还对近场光学检测

仪器的特点、关键技术和测量系统的性能和适用性进行深入的讨论；介绍了纳米光场多参数，如振幅、相位、矢量场、磁场、偏振等，测量的新原理和新方法；并针对纳米光学、等离激元光学的实验测量问题引用了大量研究实例给予详细讨论。

本书第一部分为基础和入门部分，包括第1~7章。将介绍近场光学发展史、近场光学、纳米光学和等离激元光学的相关基础电磁场理论、基本概念、理论方法和数值计算方法、光学天线原理、近场光学探针、近场光学显微镜探测系统、孔径型和散射型近场光学显微镜等。

本书第二部分介绍基于近场光学原理的测量方法和测量系统，并按照测量的物理量进行讨论。除了传统的超衍射分辨光学成像之外，近场光学方法进入到近场光谱测量和纳米光场全参数测量。第8~13章中，讨论了纳米光场的强度测量、振幅/相位测量、偏振矢量场测量、光频磁场和近场光谱测量。

本书第三部分主要介绍近场光学方法在纳米光场和多种样品测量中的应用，给出一些研究和应用实例，并进行讨论和分析，包括第14~17章，其中第14章介绍探针增强拉曼光谱术（tip-enhanced Raman spectroscopy, TERS）。第15章介绍纳米光源测量的研究进展。第16章通过大量实例，介绍了等离激元光学中聚焦器件、等离激元透镜、螺线结构 SPP 器件、Bow-tie 结构光学天线、SPP 回路等的纳米光学测量应用和测量实例。第17章介绍了纳米光场相位、振幅、矢量场和光频磁场等物理参数测量研究进展，并给出许多实例。通过介绍和讨论国际上最新发表的研究结果，使读者更具体、更深入地了解国际上的前沿研究成果和这个领域的进展，并为实际运用这项技术解决纳米光场测量的问题打下一定的基础。

作者希望通过本书的阅读，读者能够了解近场光学测量的基本原理和方法，对基于近场光学显微镜的纳米光学测量仪器系统及其关键技术有较为深入的了解，对近场光学超分辨成像和纳米光场多参数测量有更多的认识，激发创新概念，开发创新方法，为解决等离激元光学、纳米光子学、纳米光谱等领域的测量表征提供更好的、更强的技术手段，在纳米光学研究领域获得更多创新性成果。

本书是王佳教授，武晓宇博士和博士研究生孙琳共同撰写的。王佳教授对全书的整体结构进行了设计，对撰写内容进行了编选，撰写了前言、第1, 4, 5, 8, 9, 13~16章和第2, 6, 7章部分内容，并且对全书进行了统稿和审定工作。武晓宇博士撰写了第6, 10章和第2, 17章的部分内容。孙琳撰写了第3, 11, 12章和第2, 7, 17章的部分内容。张明倩博士参与了第14章的撰写工作并绘制了多幅原理图。

这是作者第一次尝试对纳米光学测量领域中近场光学测量原理和关键技术、

测量方法和仪器系统、创新方法和最新成果进行较为系统的介绍。由于收集资料的完整性和作者水平的局限，书中会存在很多问题和不妥之处，敬请读者给予批评指正，我们将进一步进行修改和补充，使这本书更加完美。

希望进一步深入研究近场光学显微镜、纳米光学和等离激元光学测量方面问题的读者还可以参考相关著作和文献资料。

参 考 文 献

- [1] Abbe E B z. Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung. Arch. Mikrosk. Anat., 1873, 9: 413-468.
- [2] Born M, Wolf E. Principles of Optics. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [3] Synge E H. A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region. Philosophical Magazine, 1928, 6 (35): 356-362.
- [4] 朱星. 近场光学和近场光学显微镜. 北京大学学报: 自然科学版, 1997, 3 (33): 394-406.
- [5] Pohl D W, Denk W, Lanz M. Optical stethoscopy-image recording with resolution $\lambda/20$. Applied Physics Letters, 1984, 44 (7): 651-653.
- [6] Betzig E, Lewis A, Harootunian A, et al. Near-field scanning optical microscopy (NSOM) - development and biophysical applications. Biophysical Journal, 1986, 49 (1): 269-279.

目 录

基础篇

第 1 章 近场光学发展史	3
1.1 近场光学和近场光学显微镜的发展简史	3
1.1.1 最初的动机——突破衍射极限	3
1.1.2 基本概念的提出	4
1.1.3 实验证明	4
1.1.4 超分辨成像的实现	5
1.1.5 表面等离子激元和 SERS	6
1.1.6 现代近场光学显微镜	6
1.1.7 PSTM 与外差探测方法	8
1.1.8 真实图像与虚假图像	10
1.1.9 近场散射与场增强	10
1.1.10 近场光学与光学天线	11
1.2 近场光学理论研究	12
1.3 近场光学最近的发展	14
1.4 本章小结	15
参考文献	15
第 2 章 近场光学原理	23
2.1 近场光学原理发展概况	24
2.2 从“光学远场”到“光学近场”	25
2.3 不确定性原理解释	27
2.4 角谱（平面波展开）方法的解释	29
2.5 表面（纳米）结构与隐失场	30



2.5.1	全反射与隐失场	30
2.5.2	精细结构与隐失场	32
2.6	近场光学探测原理	34
2.6.1	近场光学探测机理	34
2.6.2	Courjon 的模型	34
2.6.3	近场探测的核心问题	36
2.7	近场光学中的互易定理	37
2.7.1	互易定理的定义	38
2.7.2	互易定理在近场光学中的应用形式	39
2.7.3	互易定理在近场光学中的研究进展	41
2.8	等离激元光学基本原理	42
2.8.1	金属中自由电子的谐振模型	42
2.8.2	SPP 定义	43
2.8.3	SPP 的激发条件与方式	43
2.8.4	SPP 的传播和损耗	46
2.8.5	局域表面等离激元	47
2.9	本章小结	49
	参考文献	50
第 3 章	光学天线	52
3.1	引言	52
3.2	光学天线基础	52
3.2.1	光学天线及相关物理量的定义	53
3.2.2	光学天线的常见形式	55
3.2.3	光学天线的研究内容	58
3.3	光学天线的研究模型及方法	59
3.3.1	经验式 F-P 共振模型	59
3.3.2	纳米等效电路模型	62
3.3.3	电流积分模型	66
3.4	光学天线的应用	68
3.4.1	光学天线在光发射中的应用	69
3.4.2	光学天线在纳米成像中的应用	71
3.4.3	光学天线的共振调节应用	73
3.5	本章小结	75

参考文献	76
第 4 章 近场光学探针	79
4.1 近场光学探针是光学显微镜的核心器件	79
4.2 近场光学探针的原理	79
4.2.1 探针与光学分辨率	80
4.2.2 探针与成像质量	80
4.2.3 探针类型决定了间距控制方式和系统工作模式	81
4.3 近场光学探针的种类	81
4.3.1 介质探针	81
4.3.2 孔径型探针	83
4.3.3 散射型近场光学探针	91
4.3.4 等离子激元探针	97
4.3.5 单分子探针和微粒功能探针	103
4.3.6 其他功能探针	104
4.4 探针与基片间的相互作用	105
4.5 近场光学探针的应用	105
4.6 本章小结	106
参考文献	106
第 5 章 近场光学显微镜系统	110
5.1 近场光学显微镜测量系统	110
5.2 近场光学显微镜的基本结构	110
5.2.1 光源和聚焦耦合系统	111
5.2.2 光纤孔径探针或无孔径探针	112
5.2.3 探针/样品间距测控与驱动系统	112
5.2.4 样品扫描台和探针扫描头	112
5.2.5 集光系统	113
5.2.6 光电探测与视频监测系统	113
5.2.7 数据图像处理系统	114
5.3 近场光学显微镜的工作模式和扫描模式	114
5.3.1 工作模式	114
5.3.2 扫描模式	116
5.3.3 几种对比度机制	118

5.3.4	光学分辨率极限	119
5.4	扫描管与扫描台	120
5.4.1	扫描管	120
5.4.2	扫描台	122
5.5	间距测控——剪切力模式与轻敲模式	123
5.5.1	剪切力模式	123
5.5.2	法向力轻敲模式	126
5.6	多参数照明与矢量光束照明	128
5.6.1	多参数照明	128
5.6.2	矢量光束及特性	130
5.6.3	矢量光束的产生	132
5.6.4	矢量光束聚焦	136
5.6.5	纵向光场照明激发	139
5.7	近场光学显微镜的分类	140
5.7.1	扫描近场光学显微镜	141
5.7.2	光子扫描隧道显微镜	141
5.7.3	孔径型近场显微镜	142
5.7.4	散射型近场显微镜	142
5.7.5	其他类型近场显微镜	143
5.8	本章小结	143
	参考文献	144
第 6 章	孔径型近场光学显微镜	147
6.1	孔径型 SNOM 的原理	148
6.1.1	裸光纤探针的矢量响应特性	148
6.1.2	镀铝膜孔径探针的矢量响应特性	149
6.2	孔径型近场光学显微镜仪器系统	151
6.3	间距测控模式	152
6.4	照明模式与集光模式	152
6.5	孔径型近场光学显微镜的分辨率	153
6.6	孔径探针使用中的问题	154
6.7	孔径型近场光学显微镜系统	155
6.7.1	近场光学显微镜的位移控制	155
6.7.2	近场光学显微镜与近场光学成像	156

6.8	孔径型近场光学显微镜的应用	159
6.8.1	超分辨成像	159
6.8.2	近场光谱学	159
6.8.3	近场光刻	160
6.8.4	纳米光场多参数测量	160
6.8.5	其他应用	161
6.9	本章小结	161
	参考文献	161
第 7 章	散射型近场光学显微镜	164
7.1	散射型 SNOM 的原理	164
7.1.1	散射型 SNOM 系统及工作原理	165
7.1.2	散射型探针模型及矢量响应特性	166
7.2	散射型 SNOM 仪器系统	170
7.2.1	距离控制方法	170
7.2.2	照明激发与散射信号收集	171
7.2.3	信号处理与图像重构	172
7.3	探针测量中的增强效应	174
7.3.1	局域表面等离子激元共振效应	174
7.3.2	避雷针效应	176
7.3.3	镜像偶极子效应——间隙模式与微腔模式	177
7.3.4	电场梯度增强效应	179
7.4	散射型 SNOM 的对比度和分辨率	182
7.5	散射背景噪声的抑制	182
7.6	散射型探针使用中的问题	184
7.7	散射型 SNOM 的应用	185
7.7.1	近场光谱测量	185
7.7.2	近场光场多参数测量	185
7.7.3	新颖低维材料表征	186
7.8	本章小结	188
	参考文献	188

测量篇

第 8 章 纳米光场参数测量	195
8.1 纳米光场多参数测量的概念	195
8.2 测量原理与方法	196
8.2.1 光强测量	197
8.2.2 相位振幅测量	197
8.2.3 偏振矢量测量	197
8.2.4 光频磁场测量	198
8.2.5 光谱测量	199
8.3 测量系统与功能探针	199
8.3.1 测量系统	199
8.3.2 功能探针	200
8.4 本章小结	201
参考文献	202
第 9 章 强度测量与超分辨光学成像	203
9.1 光场(电场)强度测量	203
9.2 超衍射分辨光学成像	204
9.3 纳米光场强度分布测量	208
9.4 聚焦径向偏振光场测量	210
9.5 大范围 SNOM 成像	212
9.6 提高 SNOM 成像分辨率	214
9.7 近场光学图像的解释	216
9.8 本章小结	217
参考文献	218
第 10 章 振幅/相位测量	219
10.1 纳米光场振幅/相位测量发展	220
10.2 近场探测和探针外差干涉技术	221
10.2.1 光学探针外差干涉方法	221
10.3 几种典型的光场相位测量方法	223
10.3.1 孔径型探针外差干涉系统	223

10.3.2	锁相放大器的相位解调原理	224
10.3.3	散射型探针外差干涉系统	225
10.3.4	散射型伪外差干涉系统	228
10.3.5	散射型相移干涉测量系统	229
10.3.6	利用 CCD 相移干涉成像	230
10.4	一些改进型的相位测量方法	231
10.4.1	空间域和时域追踪相位测量系统	231
10.4.2	实时相位漂移误差补偿测量方法	233
10.5	本章小结	234
	参考文献	234
第 11 章	矢量场测量	237
11.1	引言	237
11.2	矢量场测量基础	238
11.2.1	纳米光场矢量特点及偏振描述	238
11.2.2	矢量场测量发展及原理	244
11.3	单一电场分量测量	247
11.3.1	纵向分量测量	248
11.3.2	面内分量测量	251
11.4	面内电场的偏振测量	251
11.4.1	探针外差干涉测量	251
11.4.2	探针多外差干涉测量	252
11.5	纵向及面内电场的偏振测量	255
11.5.1	伪外差干涉椭圆偏术	255
11.5.2	旋转偏振片椭圆偏术	257
11.5.3	散射型功能探针制备	261
11.6	全矢量场偏振测量	262
11.6.1	组合系统的直接测量	262
11.6.2	数值计算的间接测量	263
11.6.3	荧光分子探针测量	264
11.7	本章小结	266
	参考文献	267

第 12 章 光频磁场测量	270
12.1 光频磁场的间接测量	271
12.1.1 基于矢量巴比涅原理的测量方法	271
12.1.2 基于法拉第电磁定律的测量方法	273
12.2 光频磁场的直接测量	276
12.2.1 开口环功能探针测量方法	276
12.2.2 Bethe 小孔功能探针测量方法	279
12.2.3 中空金字塔功能探针测量方法	282
12.2.4 孔径探针微扰理论测量方法	284
12.3 基于互易定理的电磁场测量方法	289
12.4 本章小结	292
参考文献	292
第 13 章 近场光谱测量	296
13.1 近场光谱术	297
13.1.1 近场光谱术的发展	297
13.1.2 近场光谱的特点	300
13.2 近场光谱测量系统基本结构	302
13.2.1 基于孔径探针的近场光谱系统	302
13.2.2 基于散射探针的近场光谱系统	302
13.2.3 探针增强光谱术	302
13.2.4 近场拉曼光谱 TERS 系统测量	304
13.3 光谱成像	304
13.3.1 近场光谱成像	305
13.3.2 光谱识别与形貌对应分析	309
13.4 近场光谱测量应用	310
13.4.1 吸收谱	310
13.4.2 光致发光荧光激发谱	310
13.4.3 拉曼光谱	311
13.4.4 光致发光光谱	312
13.4.5 瞬态(时间分辨)光谱	313
13.4.6 单分子光谱	315
13.5 近场空间超分辨光谱	318