

表面等离激元纳米结构 制备与近场光学表征

Biaomian Dengli Jiyuan Nami Jiegou
Zhibei Yu Jinchang Guangxue Biao Zheng

方哲宇 朱星◎ 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

表面等离子激元纳米结构 制备与近场光学表征

Biaomian Dengli Jiyuan Nami Jiegou
Zhibei Yu Jinchang Guangxue Biao Zheng

方哲宇 朱星◎著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

表面等离激元纳米结构制备与近场光学表征 / 方哲宇, 朱星著. —北京: 知识产权出版社, 2015.4

ISBN 978-7-5130-3076-2

I. ①表… II. ①方…②朱… III. ①表面-等离子体-纳米材料-研究 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 232258 号

内容提要

本书首先对近场光学和表面等离激元作了简要概述,然后基于微纳加工技术对 SPPs 纳米结构的制备、SNOM 对 SPPs 近场光学信号的表征以及 FDTD 对实验结果的模拟计算,对金属环形结构 SPPs 聚焦、半导体纳米带 SPPs 波导、纳米结构 SPPs 耦合以及 SPPs 共振场增强效应的应用展开了详细研究,实现了亚波长单点聚焦、波导调控、颗粒捕获及 LED 发光增强等,为纳米尺度光学集成回路的构筑奠定了基础。

本书可供从事近场光学成像、纳米光源、波导耦合、“光镊”捕获及纳米光电器件研发的科技工作者阅读,也可作为广大院校本科生、研究生及教师的参考书。

责任编辑: 彭喜英

表面等离激元纳米结构制备与近场光学表征

方哲宇 朱星 著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司	网 址: http://www.ipph.cn
电 话: 010-82004826	http://www.laichushu.com
社 址: 北京市海淀区马甸南村1号	邮 编: 100088
责编电话: 010-82000860 转 8539	责编邮箱: pengxyjane@163.com
发行电话: 010-82000860 转 8101 / 8539	发行传真: 010-82000893 / 82003279
印 刷: 北京中献拓方科技发展有限公司	经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店
开 本: 720mm×1000mm 1/16	印 张: 7.5
版 次: 2015年4月第1版	印 次: 2015年4月第1次印刷
字 数: 115千字	定 价: 42.00元

ISBN 978-7-5130-3076-2

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。

前 言

表面等离激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)是一种元激发,其本质是金属和介质界面处自由电子的集体振荡。随着现代微纳加工技术的进步和基础理论研究的深入,对表面等离激元特性及其应用的研究已成为纳米光学的一个重要研究分支,即表面等离激元光子学(Plasmonics)。SPPs亚波长聚焦、超分辨成像、光子耦合、共振传感、局域电磁场增强以及光电转换等特性,使其在纳米光源、聚焦波导、纳米光电器件、粒子捕获及生物传感器等领域有着广泛的应用。为此,Plasmonics成为了一个横跨物理、化学、生物等多学科的前沿交叉研究领域。

自20世纪90年代超透射现象被发现以来,国内外对表面等离激元的研究兴趣和热潮一直有增无减,各种会议召开和科技论文发表不断,SPPs课题组也如雨后春笋般发展壮大。然而,我国在Plasmonics研究领域与发达国家相比尚有差距。为使国内Plasmonics领域的科技工作者对SPPs有更全面系统的理解,也为SPPs能更好地应用于各前沿交叉领域,实现人们对器件微型化与高度集成化的要求,作者查阅了大量的文献资料,参加了各种学术会议,并进行了反复的实验,最终完成了本书的编著,希望对SPPs研究者能有所帮助。

本书首先对近场光学和表面等离激元作简要概述,然后基于微纳加工技术对SPPs纳米结构的制备、SNOM对SPPs近场光学信号的表征以及FDTD对实验结果的模拟计算,对金属环形结构SPPs聚焦、半导体纳米带SPPs波导、纳米结构SPPs耦合以及SPPs共振场增强效应的应用展开了详细研究,实现了亚波长单点聚焦、波导调控、颗粒捕获及LED发光增强等,为纳米尺度光学集成回路的构筑奠定了基础。

本书由方哲宇编著,并由北京大学朱星教授对全书进行了审核。书中不妥之处,欢迎各位读者批评指正。

北京大学朱星教授对本书的编著给予了大量的支持与鼓励,并提供了优越的实验条件和各种合作机会,在此表示衷心的感谢。

本书可供从事近场光学成像、纳米光源、波导耦合、“光镊”捕获及纳米光电器件研发的科技工作者阅读,也可作为广大院校本科生、研究生及教师的参考书。

目 录

第1章	绪 论	1
1.1	近场光学	1
1.2	表面等离激元学的发展	3
1.3	表面等离激元学的应用和需解决的问题	4
1.4	本书内容安排	6
第2章	近场光学显微术和表面等离激元简介	8
2.1	近场光学显微术的基础知识	8
2.2	表面等离激元的基础知识	12
2.3	表面等离激元的基础知识	15
第3章	金属环形结构对表面等离激元聚焦的研究	16
3.1	概述	16
3.2	环形刻槽的表面等离激元聚焦	16
3.3	环形围栏的表面等离激元聚焦	20
3.4	环形结构的表面等离激元聚焦理论分析	30
3.5	本章小结	34
第4章	基于半导体纳米带表面等离激元波导的研究	36
4.1	概论	36
4.2	基于硫化镉纳米带表面等离激元的激发	36
4.3	基于硫化镉纳米带表面等离激元的传播	42
4.4	基于三角形硫化镉纳米带表面等离激元的聚焦	45
4.5	半导体纳米带表面等离激元波导的出光颜色调制	52
4.6	本章小结	59
第5章	表面等离激元结构耦合的研究	60
5.1	引言	60
5.2	平面内表面等离激元的耦合聚焦及背景信号分离	60
5.3	纳米光学天线和银纳米线间表面等离激元的耦合	71

5.4	本章小结	80
第6章	表面等离激元共振场增强效应的应用	82
6.1	前言	82
6.2	聚焦表面等离激元对聚苯乙烯小球的捕获	82
6.3	表面等离激元共振增强对氮化镓器件出光增强的研究	89
6.4	本章小结	96
第7章	总结与展望	98
7.1	主要工作与创新	98
7.2	SPPs研究展望	100
参考文献		102

第1章 绪 论

本书的主要内容是利用扫描近场光学显微术(Scanning Near-field Optical Microscopy, SNOM)研究和表征表面等离激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)纳米结构在纳米光学回路(Optical Nanocircuit)中的亚波长尺度的“光源”、波导、耦合、场增强效应及聚焦SPPs对胶粒小球捕获过程等重要问题上的应用。

本章首先分别介绍近场光学、表面等离激元学的特点和优势;继而讨论近场光学与表面等离激元学的关系及表面等离激元学的应用;最后是本书的整体结构安排。

1.1 近场光学

探测近场光学信号的想法最早产生于1928年^[1],但直到20世纪80年代,SNOM的发明才真正实现了利用光纤探针探测束缚在物体表面非辐射场的实验^[2]。普通光学成像的分辨率由于受到衍射极限的限制,理论上不能超过入射光波长的 $1/2$,在可见光范围内,这一值约为200nm。当入射光通过一个直径小于波长的小孔时,样品上只有相当于小孔直径的范围被照射,此时扫描成像的分辨率将取决于探针的最小尖端的直径及探针和样品之间的间距。近场光学的本质^[3]是探测由物体衍射产生的携带低于约 $2/\lambda$ 空间频率的传导分量和携带高于约 $2/\lambda$ 空间频率的非辐射分量,即隐失场(Evanescent Field)分量。而隐失场的有效范围仅限于 1λ 以下^[4],所以当使用纳米尺度的探针在样品表面扫描时,理论上可以将衍射场的非辐射分量记录下来并转换为传导分量,从而极大地拓宽了系统的频带,因此可以获得超高分辨率。

SNOM正是应用了近场光学原理突破了光学衍射分辨极限,实现了在介观

和纳米尺度的样品表面收集近场光学信息。同时, SNOM是扫描探针显微镜(Scanning Probe Microscope, SPM)家族中的重要成员之一, 和其他SPM相同, SNOM由探针、信号采集和处理、探针-样品间距反馈控制、X-Y扫描, 以及图像处理这几部分组成。

如何精确控制探针和样品间距是SNOM实现超衍射分辨本领的核心问题之一, 目前以激光光点反馈模式和剪切力反馈模式为主要的实现方式。激光光点反馈模式采用的是传统原子力显微术(Atom Force Microscopy, AFM)所使用的光点反馈系统, 两者的区别在于SNOM利用的是微悬臂镀膜光纤探针而非金属钨丝探针, 当探针接近样品表面的时候, 由四象限探测器接收参考激光在微悬臂探针上产生的反射光斑, 由此确定探针和样品之间的距离并进行反馈。剪切力反馈模式是指: 当以本征频率激振的探针靠近样品表面时($z < 50\text{nm}$), 由于激振的针尖和样品间相互作用力的存在, 其振荡幅度及相位均会发生较大变化, 由此可将探针-样品间距控制在 $5\sim 20\text{nm}$ 范围内。剪切力反馈模式无需参考激光的介入, 是一种非光学的距离调控方法, 从而使得到的光学成像图更具有真实性。而对于针尖和样品之间剪切力作用机制的研究, 有学者则通过利用不同湿度及不同阻尼介质环境下测量的音叉微电流和探针-样品间距($I-d$)曲线证明, 由于毛细凝聚作用, 探针和样品间耦合的水合碳氢化合物分子所形成的黏滞阻尼是导致探针和样品间剪切力作用的主要原因。

基于全内反射式的SNOM又称光子隧道扫描显微镜(Photon Scanning Tunneling Microscope, PSTM), 是另一种应用近场光学原理的具有超衍射极限分辨能力的光学显微镜, 其利用未镀膜的光纤探针代替传统SNOM小孔径镀膜光纤探针。当针尖无限接近样品表面时, 直接利用裸光纤探针接收近场光信号, 其分辨能力主要由裸光纤尖端中央点的面积决定, 理论上比利用镀膜光纤的小孔径SNOM的分辨率要高几十倍。但由于近场光学信息是入射激光入射角的函数, 样品表面不平相当于入射角度的变化, 会引入人为的假象; 并且由于样品形貌像和光学像混在一起, 图像的解释遇到了困难。

随着各种近场光学显微镜的不断研发和完善, 包括样品和针尖距离精确控制技术的探索及快速扫描技术的发展, 以及与其他成像技术的结合, 近场光学显

微技术必将在亚波长和纳米材料领域迎来更广泛的应用。

1.2 表面等离激元学的发展

表面等离激元(SPPs)作为金属表面的一种元激发在本质上和近场光学相似,都与高频电磁场的激发和传播有关。SPPs和光子耦合,以及由此产生的一系列特殊光学效应已经成为目前研究的热点。Raether^[5]对光滑和粗糙表面产生的SPPs做了一系列早期的研究,Knoll^[6]则比较完整地总结介绍了20世纪90年代有关SPPs的理论和实验,并且指出虽然SPPs可以产生于任何金属的表面,但是由具有微纳结构的金属表面所激发的SPPs具有更好的共振增强特性。Kretschmann、Raether^[7]和Otto^[8]是最早在实验中观测到SPPs的科学家,而Fischer和Pohl^[9]则首次将表面等离激元共振(Surface Plasmon Resonant, SPR)技术应用于近场光学显微领域。

20世纪70年代中期,科学家们发现在有吸附物的粗糙金、银、铜表面可以产生高强度的拉曼散射^[10],强度可达到无吸附时的 $10^4 \sim 10^6$ 倍,此现象称为表面增强拉曼散射(Surface-enhanced Raman Scattering, SERS)。Wokaun^[11]发现SPPs的激发和这种表面场增强效应有很强的关联性,证明当产生SERS时,SPPs被高度局域在粗糙表面的凸起或凹陷中,并且有实验表明当银的表面粗糙度为100nm、铜的表面粗糙度为50nm时,SPPs的表面增强效应较大,相应的SERS强度也较大。Wessel^[12]则提出扫描探针的针尖就像一个孤立的纳米颗粒,可以使SPPs高度局域化,实验证明此方法使样品表面产生的拉曼信号增强了8个数量级。虽然数值模拟^[13]已经能够计算出和实验相似强度的数值结果,但这并不足以完全解释实验中观察到的巨大场增强效应的产生机制。表面增强拉曼散射理论的不完善激发了更多科学家投身于SERS-SPPs增强效应的研究领域。

如何实现在近场范围内操控光子一直都是科学家研究的课题之一。1998年Ebbesen^[14]等发现光在通过金属薄膜上的二维孔径阵列时存在增强效应,即通过对阵列周期等其他参数的调试,每一个圆孔的通光效率都可以大于1,他们把这个现象归因于孔径阵列的表面等离激元增强效应^[15,16];继而又证明如果在一个单孔周围加工出一些没有把金属膜贯穿的孔径阵列或者圆环阵列,以及其他

一些表面形貌的时候,同样可以产生增强效应^[17,18]。并且Ebbesen研究组发现一些特殊的表面形貌结构可以在几微米内控制出射光束的半高宽维持在半波长左右^[19],表现出束流效应。

这种对光子运动的控制引起了全世界科学家对SPPs研究的热潮,相应的理论和实验研究也不断得到完善^[20]。2004年,Kawata^[21]等提出可以把此类具有表面周期性结构的晶体定义为“表面等离激元晶体”(Surface Plasmonic Crystals, SPC),并且认为此类晶体是二维光子晶体和SPPs共同作用的结果,其中二维光子晶体限制光子在横向的运动,SPPs限制光子在纵向的运动,两者合起来构成SPC,就可以控制光子在三维空间的运动。由于SPC的结构是纳米量级的,只能用聚焦离子束刻蚀(FIB)或者电子束刻蚀的方法来加工,因此它的发展将依赖纳米加工工艺的进步。但SPC利用的是近场光学理论,突破了光学衍射极限,并拥有局部调控光场的能力,为新型纳米光子学器件的研发提供了新的思路。

1.3 表面等离激元学的应用和需解决的问题

从20世纪90年代开始,表面等离激元方面的研究就如同雨后春笋一般在不断地发展壮大,国际上发表的相关论文数量也从最初的每年几十篇到目前的每年几千篇,越来越多的课题组投入到这个领域来研究是因为这个领域在应用方面有着巨大的发展前景^[22]。逐渐地,整个研究领域被冠名为Plasmonics,也就是我们现在研究的表面等离激元学,而Plasmonics也正因为有众多的研究分支^[23],涉及了不同交叉学科^[24],从而使我们在其他各个微纳尺度研究领域中也经常能看到它的身影^[25]。

Plasmonics之所以能成为热点研究领域之一,是因为利用光和金属微纳结构相互作用实现光和SPPs之间的能量转换,激发了无数种方法通过利用SPPs来实现对光在纳米尺度的操控和调制。本节将主要介绍Plasmonics近几年的研究重点,并介绍其在研究中遇到的问题,以及其未来发展的方向。

Plasmonics领域的发展和微纳加工技术的革新也激励了化学领域对金属纳米颗粒研究的热情,更见证了生物Plasmonic传感器的应用,所以可以认为Plasmonics是一个横跨物理、化学、生物多学科的交叉前沿领域^[26]。物理化学家们通

过合成各种形状的金属纳米颗粒,利用近场光学扫描显微镜、全反射荧光显微镜、暗场显微镜等测试手段,研究了金属纳米颗粒的SPPs信号及对局域场的共振增强现象^[27]。越来越多的Plasmonics光学特性被发掘出来,这也就催发了化学家们对更多奇异形状的纳米颗粒的合成研究,以及促使了物理学家们利用纳米加工及检测手段对SPPs的表征^[28]。

SPPs因为其本身是局域在金属样品表面的电磁场信号,因而和近场光学有着天然的联系,为了直接观察和研究SPPs的共振特性^[29],SNOM是必不可少的探测SPPs的手段之一^[30,31]。

微纳加工技术及强大的理论仿真模拟加速了Plasmonics研究领域的发展。前期的大量利用有限元方法和有限时域差分方法模拟的结果给后来者的研究积累了理论基础,并预示着实验前进的方向。早期最先应用和发展Plasmonics相关结果的是那些研究有关生物传感方面的科学家^[32,33],他们利用SPPs的独特光学性质和传感特性,研究了生物分子荧光及癌症细胞监视方面的工作。在这些生物细胞中,金属纳米颗粒发挥了巨大的作用,这些工作体现了生物、化学、物理学科的交叉融合^[34,35]。

Plasmonics在光电器件中 also 发挥了巨大的应用潜力,如微纳光电器件及太阳能电池的应用^[36,37]。对于光伏电池的发展来说,遇到的最大问题在于如何增强器件在吸收光并转化成电的关键部位的应用,一个比较可行的方法就是在接收板的背面加工微纳尺度的槽形结构,从而利用SPPs的共振增强效应实现整个器件的光电转化率的提高。

对于传播表面等离子激元(SPPs),利用纳米结构实现对SPPs的聚焦并获得高强度SPPs波,也可应用于纳米印刷技术^[38],因为SPPs的结构效应所能得到的超高分辨率可以达到类似深紫外电子束曝光技术的分辨率。但如何利用纳米结构快速方便地得到一个亚波长尺度的SPPs聚焦点,仍为现在研究的热点之一。

微纳光电器件同时也需要在纳米尺度的光波导来实现高度的集成化^[39],SPPs波导的研究为其提供了很好的研发基础,其中金属纳米线,如银纳米线,表现出了很好的SPPs传播特性,但同时也遇到了很大的挑战,因为如何将SPPs有效地耦合进银纳米线,并使之有效出射,依然是Plasmonics研究中的最大挑战。

另外,将半导体纳米线放置在金属表面,实现SPPs的传播也是一种新的思路。

利用SPPs研究和监测样品结构表面热效应的相关报道也随即出现^[40],如利用聚焦SPPs捕获粒子小球等。但是如何在纳米尺度得到SPPs力学或热学效应的检测,依然是众多科研人员努力攻关的科研目标之一。

正因为Plasmonics研究领域的巨大发展前景,科学家们均认为在未来20年内,Plasmonics将继续长久健康地发展,其发展的方向将主要集中在以下几个方面:①量子领域的表面等离激元学^[41],为新的Plasmonics理论和实验指明了方向;②Plasmonics的相干现象^[42],如Fano共振、超辐射和亚辐射模式,以及其中的共振线形控制;③Plasmonics在非线性光学和光学器件上的应用^[43];④基于局域SPPs的纳米尺度生物传感器的研发^[44];⑤SPPs在化学反应中所起的调节作用;等等。

1.4 本书内容安排

本研究的主要目的是利用SNOM研究和表征SPPs在纳米光学回路中SPPs“光源”、SPPs波导、SPPs耦合及SPPs场增强效应的应用这四个方面的问题。本书内容安排也将主要按照以上所提及的四个部分进行分类总结。

第2章首先将介绍SNOM成像的基本原理和SPPs的基本概念。通过角谱法(Angular Spectrum)讨论光学的近场(Near-field)和远场(Far-field)的区别,并介绍SNOM和SPPs之间的内在联系和相关领域的最新进展。

第3章将主要介绍利用微纳加工手段制备的金属表面微结构的SPPs聚焦性质及SPPs在结构内干涉条纹的调控方法,从而引入纳米尺度SPPs“光源”的概念。

第4章将重点介绍基于半导体纳米带的介质承载SPPs的激发、传播和聚焦过程。通过SNOM对SPPs波导的原位激发和探测手段,研究介质承载SPPs产生机理,并利用弗朗兹-凯尔迪什(Franz-Keldysh)效应来解释出射光能量红移的现象。

第5章将着重讨论SPPs耦合方面的工作,包括利用平面内菲涅尔波带片实现对SPPs波的聚焦及背景信号分离,以及光学纳米天线和银纳米线之间SPPs

耦合增强的研究。

第6章将涉及SPPs场增强效应应用方面的工作,包括利用聚焦SPPs波实现对胶粒小球的捕获和尺寸删选,以及SPPs共振增强对氮化镓(GaN)LED的出射增强的作用。

第7章是对全书的总结和对Plasmonics领域发展的展望。

第2章 近场光学显微术和表面等离激元简介

本章将介绍相关的背景知识,详细的实验数据、理论分析及模拟计算过程将在后面对应的章节中述及。本章主要内容包括以下两个方面:①近场光学基本理论和近场光学显微术(SNOM);②表面等离激元(SPPs)的基本概念简介。

2.1 近场光学显微术的基础知识

2.1.1 近场光学研究方法

早在20世纪20年代,近场光学的基本设想就已出现,但真正将这一设想付诸实践的却是在20世纪80年代。在近场光学发展的初期,如何不断提高光学分辨率一直是科学家们研究的热题。直到20世纪后期,随着纳米光学的发展,近场光学才得到重视,因为近场光学反映的是电磁场与亚波长量级物体之间的相互作用,可以给纳米尺度的光探测手段带来新的技术突破和研究课题。本节将主要介绍近场光学的基本概念、原理及其研究方法。

2.1.1.1 角谱^[45,46]分析——光学近场的引入

传统显微光学分析方法建立的基础是电磁波的标量场理论^[47]。在无限大空间中传播的平面电磁波满足标量形式的无源场亥姆霍兹(Helmholtz)传播方程

$$\nabla^2 U + k^2 U = 0 \quad (2-1)$$

式中, U 代表标量场场强。它的一组具有复波矢 k 的平面波特征解为

$$U = U_0 \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \quad (2-2)$$

需要说明的是:电磁波标量场亥姆霍兹方程是电磁场麦克斯韦(Maxwell)方程组在体系尺度远大于电磁波波长时的近似理论。

假设在空间中的某个平面内测量这个平面波的振幅,为简单起见,设该平面

为 $z=0$ 。标量函数 $U(x, y, 0)$ 可以在频域空间 (k_x, k_y) 转换为相应的傅里叶函数 $A_0(k_x, k_y)$ ：

$$A_0(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U(x, y, 0) \exp[-i(k_x x + k_y y)] dx dy \quad (2-3)$$

这个表达式称作 $z=0$ 平面内的平面电磁波的角分布谱, 它的特征解为

$$A(k_x, k_y, z) = A_0(k_x, k_y) \exp(-iz \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2}) \quad (2-4)$$

当 $k_x^2 + k_y^2 < k^2$ 时, 为传播场 (Propagating Field / Propagating Wave), 电磁波可以传播到远处。平面波从一个平面传播到另一个平面的过程可以简单地看作是发生了一个相移, 而强度并不发生变化。但当 $k_x^2 + k_y^2 > k^2$ 时, 情况却截然不同

$$\begin{aligned} A(k_x, k_y, z) &= A_0(k_x, k_y) \exp(-z \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2}) \\ &= A_0(k_x, k_y) \exp(-\mu z) \end{aligned} \quad (2-5)$$

式中, $\mu = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2}$ 。此时电磁场沿 z 方向呈指数衰减, 不能传播到远处, 这种被束缚在样品表面的电磁场称为隐逝波 (Evanescent Wave); 并且称隐逝波存在的区域为近场 (Near-field), 它位于表面附近大约 $\lambda/2$ 的范围之内。相对应地, 一般称近场以外的区域为远场 (Far-field)。

2.1.1.2 光学显微镜的点扩展函数和衍射极限

本节的内容将主要介绍通过引入点扩展函数 (Point Spread Function, PSF) 的概念导出传统光学显微镜的分辨率极限: 瑞利极限^[47, 48]。点扩展函数 h 是物面上的一个点源 (δ 函数) 经过成像之后的像场 E_i^0 , 用公式表达, 即为 $h_z(x_i, y_i; x_0, y_0) = E_i^0(x_i, y_i)$ 。

考虑一个实际中的光学显微系统, 用 δ 函数描述在物面上的一个无限小的物点, 其角谱可以写成

$$A_0^0(k_x, k_y) = F(\delta(x, y)) = 1/2\pi \iint \delta(x, y) \exp[-i(k_x x + k_y y)] dx dy \quad (2-6)$$

对于位于远场的探测器来讲, 只有 $\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \leq 2\pi n/\lambda$ 的角谱信息才可以被收集到, 而其余部分的角谱信息将被限制在近场区域。所以像面上的像可以表

示为

$$I^0(x, y) = [h_f(x, y)]^2 = \left[\frac{J_1\left(\frac{2\pi NA}{\lambda} \sqrt{x^2 + y^2}\right)}{\frac{2\pi NA}{\lambda} \sqrt{x^2 + y^2}} \right]^2 \quad (2-7)$$

式中, J_1 是第一类贝塞尔(Bessel)函数, 它的形状是一个圆斑——Airy 斑。主峰的半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 $0.61\lambda/NA$, 正是这样的衍射效应造成了传统光学显微镜的分辨率极限(Rayleigh Limit)。

考虑近场显微系统的PSF, 使用一个尖端开有亚波长小孔的锥形光纤探针在物面上收集光信号。在理想情况下, 锥形针尖与样品间距离足够小, 角谱的所有分量都被均一收集, 那么它的PSF 就是一个把所有角谱都均一收集的傅里叶逆变换—— δ 函数^[49]。根据针对理想成像系统的PSF的讨论可知, 这样的成像可以不损失任何细节信息, 所以从理论上讲, 这种办法是没有分辨率的极限。但随着针尖和样品之间的距离 z 不断变大, 系统所丢失的高空间频率的信息越来越多, 成像的分辨本领将越来越差^[50]。

2.1.2 近场光学显微镜

2.1.2.1 历史回顾

尽管探测近场光学信号的思想产生得很早^[1], 但当时要将小孔和样品的距离稳定控制在半个波长以内是不现实的。直到1972年才由E. A. Ash和G. Nicholls首先利用 $\lambda=3\text{cm}$ 的微波实现了 $\lambda/60$ 的分辨率^[51]。对于可见光的波段, 则是在20世纪80年代初, SNOM探针和样品间距可以稳定控制在纳米尺度上以后才得以实现。

最常见的SNOM使用的是一个具有很小孔径(30~100nm)的光纤探针^[52, 53], 在很接近样品表面的区域(10nm)进行扫描。SNOM光纤探针可以分别作为激发光源(传导入射激光), 或者作为近场光信号的接收器(传导探测信号)。探针和样品之间的反馈控制模式从最早的STM模式、隐失场光强反馈模式, 直到近年来广泛应用的接触模式、非接触模式、切变力模式和轻敲模式, 逐步变得更加灵敏和稳定^[54, 55]。