

文章编号: 1002-2082(2005)03-0036-05

近场光学显微技术

王海潼, 刘 斐

(西安武警工程学院通信工程系, 陕西 西安 710086)

摘要: 本文在介绍近场光学显微镜原理的基础上, 对近场光学显微技术进行了一定深度的探讨, 并着重研究了纳米级探针的制作和纳米级样品与探针间距的控制这两个近场光学显微技术中的关键问题, 说明了近场光学显微探针的工作方式, 阐述了近场光学成像的衬度类型, 介绍了近场光学显微技术在多个领域的应用。在参考大量国内外最新研究成果的基础上, 提出了一些个人的见解。

关键词: 近场光学显微技术; 探针; 样品-探针间距

中图分类号: TH742

文献标识码: A

Summarization of Near-Field Optical Microscopy

WANG Hai-tong, LIU Fei

(Armed Police Engineering College, Xi'an 710086, China)

Abstract: In this paper, the principle of the near-field optics microscope is introduced, the technique of near-field optics microscope is explored, and the two key problems with the fabrication of nano-probes and the control of distance between the nano-probe and the nano-object are researched. The operating mode of the NSOM nano-probe is explained. The contrast type of near-field optical imaging is expounded. The application of NSOM in many fields is introduced. Some personal opinions are proposed based on the great number of outcomes of scientific reseraches at home and abroad.

Keywords: near-field optics microscope technique; probe; pitch of probe and object

引言

传统光学显微镜(远场)是显微镜家族中最年长的成员,它曾经是观测微小结构的唯一手段。传统光学显微镜由光学透镜组成,利用材料的折射率和透镜的曲率,将被观察的物体放大,以获得其细节信息。然而,光的衍射效应限制了光学显微镜分辨力的进一步提高,即光学显微镜的放大倍数不能任意增大,这就是瑞利分辨力极限。

瑞利判据建立在传播波的假设下,如果能够探测非辐射场,就能规避瑞利判据,而且完全突破衍射壁垒的限制。近场光学是随着科学技术向小尺寸和低维空间推进所出现的光学领域中的一个新型交叉学科,其研究对象是距离物体表面一个波长(几个纳米)以内的光学现象。近场光学显微术是一种新型超高分辨率显微成像技术,是探针技术与光

学显微技术相结合的产物,是近场光学中的一个重要组成部分。近年来,近场光学显微术在理论和实践上都取得了突破性的发展。近场光学显微镜分为近场扫描光学显微镜(NSOM)和光子扫描隧道显微镜(PSTM)。本文主要研究近场扫描光学显微镜(NSOM)。

1 近场扫描光学显微镜(NSOM)

1.1 近场光学显微镜构成与工作原理

近场光学显微镜由探针、信号传输器件、扫描控制、信号处理和信号反馈等系统组成。

近场产生和探测原理:入射光照射到由许多大小不一的小物体组成的大物体上,这些小物体被入射场激发而重新发光,产生的反射波包含限制于物体表面的隐失波和传向远处的传播波。隐失波来

收稿日期:2004-09-07; 修回日期:2005-01-11

作者简介:王海潼(1966-),女,江苏滨海人,西安武警工程学院通信工程系讲师,主要从事光电技术及光纤通信方面的教学科研工作。

自于物体中的细微结构(小于波长的物体),而传播波则来自于物体中粗糙的结构(大于波长的物体),后者不含任何物体细微结构的信息。如果将一个非常小的散射中心作为纳米探测器(如探针),放在离物体表面足够近的地方,将隐失波激发,使它再次发光。这种被激发而产生的光同样包含不可探测的隐失波和可传播到远处探测的传播波,这个过程便完成了近场的探测。隐失场(波)与传播场(波)之间的转换是线性的,传播场准确地反映出隐失场的变化。如果用一个散射中心在物体表面进行扫描,就可以得到一幅二维图象。根据互逆原理,将照射光源和纳米探测器的作用相互调换一下,采用纳米光源(隐失波)照射样品,因物体细微结构对照射场的散射作用,隐失波被转换为可在远处探测的传播波,其结果完全相同。

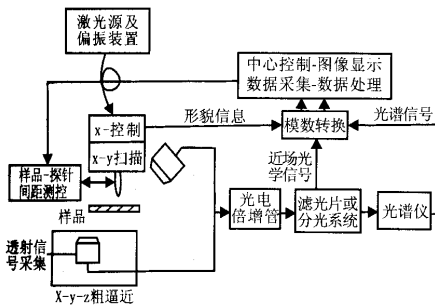


图1 近场光学显微镜成像原理

Fig. 1 Principle of near-field scanning optical microscope

近场光学显微是由探针在样品表面逐点扫描和逐点记录后数字成像的。图1是一种近场光学显微镜的成像原理图。图中x-y-z粗逼近方式可以用几十纳米的精度调节探针至样品的间距;而x-y扫描及z控制可用1 nm精度控制探针扫描及z方向的反馈随动。图中的入射激光,通过光纤引入探针,并可根据要求改变入射光的偏振态。当入射激光照射样品时,探测器可分别采集被样品调制的透射信号和反射信号,并由光电倍增管放大,然后直接由模数转换后经计算机采集或通过分光系统进入光谱仪,以得到光谱信息。系统控制、数据采集、图像显示和数据处理均由计算机完成。由以上成像过程可以看出,近场光学显微镜可同时采集3类信息,即样品的表面形貌、近场光学信号及光谱信号。

1.2 近场光学显微技术中的两个关键问题

1.2.1 纳米级探针的制作

由于该技术是利用探针尖端收集光场信息的,

所以探针尖越细,探测到的精细结构越丰富,其分辨率也就愈高;但是探针尖端愈细,光通过率也就愈小,则灵敏度越低。因此,需要根据具体要求制作合适的纳米级探针。

目前,国内外一般均采用光纤作亚微米级探针。纳米级探针的制作,需要解决两个方面的问题,即探针削尖化和亚波长孔径的制造。

1) 探针削尖一般有两种方法

腐蚀法:利用HF酸和氨水对光纤芯与包层具有不同的腐蚀速度来削尖。该方法应用极为广泛,具有高重复性,能根据需要制造出不同种类的光纤尖,如采用多步腐蚀法即得到笔型、弯曲型光纤尖等。探针的圆锥角可由缓冲腐蚀液中的氨水与HF酸的比例(X:1)改变,当X由0.5增大到1.5时,针尖的圆锥角由 15° 增大到 30° 。但此种方法得到的光纤尖常有腐蚀坑和毛刺,形成分散的散射中心。目前,有一种不去掉光纤保护套对其进行腐蚀的方法,用这种方法制得的针尖比裸露纤芯腐蚀法所得的银形尖光滑得多。

熔拉法:这种方法是利用 CO_2 激光使光纤熔融后,在其两端施以较小的力,使其成丝形,再以较大的力迅速将其拉断,断面自然形成锥面。这种方法形成的锥面比较光滑,然而在相同锥长和针尖相对孔径相同的条件下,腐蚀铝比熔拉法具有更高的传输效率。

两种方法相比,熔拉的针尖尺寸一般为50~200 nm,而腐蚀的针尖可小于50 nm。腐蚀的针尖圆锥角也较大,所以透过率往往比熔拉法的高出二、三个数量级。但实验也表明,对于尺寸相同的针尖,熔拉法制作的抛物形的透过率比腐蚀法制作的锥形针尖透过率高。腐蚀法简单实用,但较难以改变针尖的形状,而熔拉法可较为容易地制作不同形状的针尖,只是设备复杂昂贵。

2) 亚波长孔径的制造也有两种方法

对所制作的光纤尖,先镀一层金属膜,然后用KI等溶液进行化学腐蚀。对已镀有保护层的光纤尖,利用纳米光刻法得到亚波长孔径。还有一种方法是对腐蚀铝进行真空蒸镀,膜层在其顶端形成一个光孔,制成探针。第二种方法比第一种方法制作精细,控制也更精确一些。

国外还有一种将熔拉法和腐蚀法结合的两步

探针制造法:首先以 CO₂ 激光加热单模光纤,经熔拉形成一个其顶端具有细纤丝的抛物面型传输尖铝,然后以5%的HF进行腐蚀。这样就除掉了细纤丝,形成一个抛物面尖锥,这种探针的尖端尺寸大小和传输光效率都较适合近场探测。

1.2.2 纳米级样品-探针间距的控制

只要能将探针控制在距离样品表面一个波长以内,又能在探测过程中对样品表面进行无接触扫描探测,就能突破瑞利极限,实现超高分辨率探测。

剪切力调制是一种被证明可保证探针-样品间距在亚波长范围内的可靠和稳定的非光学调制法。探测剪切力的一般方法是使光纤头以其谐振频率作平行于样品表面的微小振动,振幅一般只有几个纳米甚至更小。在探针尖靠近样品的过程中,由于受到随间距不同而具有不同剪切力的阻碍,使得光纤头的振幅和相位均发生变化。测出探针振幅与相位的变化,就可确定探针-样品间距的大小。实际中通常采用压电陶瓷的压电效应测控样品-探针间距。将高频振动压电管分为上下两部分,下半部分以交流电压激励振动;上半部分有两个电极,用于探测压电陶瓷管(DPT)的振幅。由于剪切力对于探测振动的阻碍,DPT内部产生张力;又由于压电效应引起感应电压,将感应电压作为反馈信号,经锁相放大器达到控制样品-探针间距的目的。这种方法可使近场光学显微镜的调整简单化。另外,还可利用超声共振法和电压-声学法、电子系统的阻抗变化、电容传感器等来测控样品-探针间距。

1.3 近场光学显微镜的分类

近场光学显微镜以其探针工作方式分为3种

1.3.1 C-mode 模式,即收集模式

如图2(a)所示,传输光以全反射角照射到样品

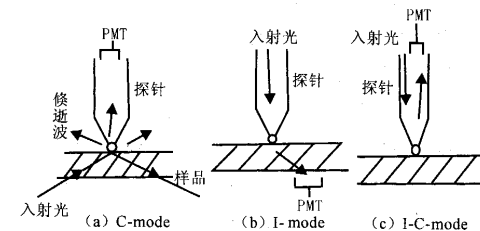


图2 近场光学显微镜的工作方式

Fig. 2 The operating mode of NSOM

基底上,在样品表面上产生隐失波,并被处于样品表面一个波长以内的探针所探测。该隐失波光功率

的一维分布包含有样品的三维特征信息,也可显示探针的位置函数。C-mode模式的优点是入射远场光的极化状态可根据需要调整,且隐失波功率沿垂直于样品表面迅速衰减,所以可以控制样品-探针间距,使探测到的光功率为常数。这种方法是等强度测量。

1.3.2 I-mode 模式,即照明模式

如图2(b)所示,处于样品表面纳米处的探针尖端微波长孔径产生的隐失波照向样品,在样品表面上产生新的隐失波及传播波;处于样品下面的光电探测器探测到新的传播波,可得到探针位置函数及样品精细结构信息。这种模式的优点是可选择性地照明样品,从而实现最佳对比度,但该模式的入射光极化强度难以依据需要来调整。

1.3.3 I-C-Mode 模式,即照明-收集混合模式

如图2(c)所示,由探针尖端微波长光孔产生的隐失波照向样品,再由同一探针探测产生于样品的隐失波与传播波,从而得到探针位置函数及样品精细结构信息,但这种方法信噪比较低。

以上三种模式,由于探测光功率随孔径的减小而减小,探测灵敏度与分辨率之间存在一定的矛盾。为此,提出了一种探测灵敏度较高的光波相变探测法。由于物体内部和外部结构存在微小变化,当光照射到样品上时,光的折射特性与散射特性均发生微小变化;通过探测透射光和折射光等相位的微小变化,再经过分析处理,可以得到样品内部和表面的精细结构。该方法分辨率高,目前已得到广泛应用。

1.4 近场光学显微技术中的衬度问题

NSOM的工作方式,通常采用非光学信息与光学信息同时成像的方法。非光学信息的衬度反映表面局域电子态密度、探针与样品的Vander Waals力和切变力及毛细力等的变化,为相应区域的光学分析提供空间定位。而光学信息的衬度直接反映局域光的反射、吸收、折射率变化、荧光激发、偏振及局域光致发光或电致发光等。涉及近场光学成像的衬度类型主要有以下4种。

1.4.1 光强衬度

直接来源于样品的反射或透射,是目前各类SNOM中采用最广泛的衬度方式。光强信号直接反映局域反射率、透射率或折射率的变化。但由于

探针与样品相互作用、散射、多重反射等,使近场图像的解释复杂化。当探测光发射时,光强衬度则给出发光强度的空间分布。

1.4.2 相位衬度

指由于折射率的实部变化而影响探测光束相位所引起的衬度。在远场光学中,这种衬度效应较小;而在近场观察中,由于折射在实部的微小局域变化引起的相位衬度足够大,所以可以用来观察低衬度的生物样品、相位调制光栅以及微加工工艺中的微结构检测。利用这种相位衬度可以直接研究局域折射率的微小变化。

1.4.3 偏振衬度

来源于样品内部对称性对线偏振或圆偏振光的响应。在NSOM中,与样品相互作用后光的偏振状态可由反射光的偏转角(Kerr效应)或透射偏转角(Faraday效应)测得。理想中通过探针的光偏振性,应与入射束相同。但研究结果表明,在探针处的消光比(表明偏振程度)仍可高达2000:1。偏振衬度主要应用于磁光存储器件的检测以及具有偏振效应的单分子与半导体器件测量。

1.4.4 频谱衬度

其与近场信号中不同波长有关系。样品的激发产生光致发光、光荧光等频率响应光谱。近场光学和远场一样也可以用滤色片、双色镜或其它分色装置获得频谱衬度。事实上,特定波长的强度成像技术(k-mapping)已经用于如扫描电镜中的元素特征x射线成像等技术中。SNOM涉及的频谱范围可能由微波波段至可见光,直到紫外波段,相应的近场光谱涉及到高空间分辨率的光致荧光、激发光致发光及拉曼光谱等。

另外还有一种独特的NSOM衬度方式是时间衬度,即样品结构的光学响应随时而变化。这种衬度方式随时间的响应能够提供样品中的一些动态信息,如半导体中载流子的产生、迁移、扩散或驰豫过程。由于这些过程往往发生在极短时间(飞秒——皮秒)的瞬态,有人把NSOM将纳米尺度空间分辨率和飞秒时间分辨的结合称为第四度空间的研究。

2 近场光学显微技术的应用

2.1 物理领域

近场光学显微技术源于物理,在物理领域应用

极其广泛。首先,可用于光学成像。由近场光学所成像的分辨率达到了纳米量级。其次用于基本物理过程,如场条件下的光谱学研究。目前的各类光谱测量方法大都在宏观平均值水平,即使用微区光谱也只限于微米尺度观察。而用低温近场光谱研究CaAs/AlCaAs单量子线、多量子线的光致发光现象,可以在纳米尺度明确无误地揭示不同光谱的来源及其本征值。由于量子线的尺度是已知的,因此可准确地测定分辨率,而无须用附加的校正方法来确定仪器的响应函数。用近场光谱仪可以区分几十纳米量子线的光发射及单个或多个量子阱的发射谱,并且在研究量子点、纳米晶体、表面缺陷与位错、量子球与多孔硅等方面发挥了它独特的作用。另外,利用C-mode PSTM,通过收集产生于波导表面的隐失波,对绝缘光波导进行高分辨率无损探测。利用这种方法发现了光波导微波长散射源,从而提高了在设计中形成导层掩模的精确性,减少了导管的导波损失。在国外,用近场光学显微镜已经探测到来自单个染料分子的荧光,其高分辨率是传统远场探测的光学显微镜无法达到的。在大规模集成电路当中,利用反射式NSOM,对SRAM芯片进行表现成像来测量电路的线宽,将有非常广泛的应用前景。

2.2 生物领域

将近场光学显微术应用于生物研究领域,可以得到亚波长级生物分子的结构图像,也可得到生物标本的细胞膜厚度以及聚合构特征尺寸,如细胞膜内连接元素等纳米级精细结构信息;还可用光波相变法观测内部与外部结构在某一特定条件下发生的微小变化。国外利用PSTM已得到椭圆头直径为100 nm和圆柱尾直径为10 nm的纳米生物标本噬菌体细菌图像,以及作为分子级典型代表的沙门氏菌鞭毛图像,其鞭毛直径为25 nm,并且由鞭毛一部分核断面放大图给出了一个小于10 nm分辨率的估计。1992年,AT&T贝尔实验室利用自己研制的镀膜光纤探针扫描近场光学显微镜,得到了 $4 \times 4 \mu\text{m}$ 区域内吸附在30 nm厚的PMMA膜上的染料分子探针DiIC₁₂(3)的分布。所得到的单个分子的相对位置可以确定到5~15 nm,其光强分布信息可以很好地被理论解释,并可以推断出这些染料分子的取向。对染色荧光分子的研究只是近场光

学显微镜技术迈向生物领域的第一步。作为首先被光学显微技术发现和研究的细胞,自然而然地就成为近场光学显微镜应用的主要方向之一。1994年,美国太平洋西北实验室报道,他们利用近场光学显微镜研究叶绿素系统中的一些独立蛋白合成物在 thylakoN 膜上的分布情况。劳伦斯-伯克利国家实验室将血红蛋白用红、绿两种荧光分别染色,在获得形貌像的同时,得到了荧光分布,从而分析了两种蛋白在内膜上的分布相关性。

2.3 高密度光存贮

信息技术的核心是信息的高密度存储。由于近场光学显微镜对环境条件要求低,在目前成熟的光盘技术基础上,它已成为各种近场高密度信息存储技术的强有力竞争者。理论分析近场存储密度可达 6.5 Tb/in^2 。目前,已在光盘上得到直径为 50 nm 的光斑,在透射情况下,可以 4.5 Gb/in^2 和 $\text{E}1\text{q}$ 密度向磁光盘写入或从该密度盘中读出信息。存储材料一般为光刻 b 相交材料和光致变色薄膜等几种,其中光致变色材料具有高分辨率、高灵敏性及可多层记录等性质,具有很大的研究和发展潜力。由于近场光存储中探针处于样品表面近场区域内,且孔径很小,因而投射到样品表面的光斑很小,甚至比一个分子还小,只有处于光斑中的分子吸收光子发生光色反应,才能实现利用分子双稳态来存储信息。目前,对于光致变色材料的存储和读取,国外已提出一种比较理想的读出方法——荧光探明法。利用这种方法,可以得到具有高信噪比和高密度的近场光致变色存储。采用近场技术,读写斑的尺寸可以减小到 20 nm ,存储密度可以提高到 125 Gbit/cm^2 。按此密度计算,一张 30 cm^2 光盘的总容量可以达到 10^{14} bit ,相当于美国国会100年档案信息的总和,接近人脑的总存储能力。由此可见,近场光学显微镜在提高信息存储密度方面有着巨大的潜力。另外,光刻技术也是因乐学的衍射,只能加工微米量级的图像,而当波长小于 193 nm 时,就很难找到合适的镜头材料。NSOM 可用来对材料表面进行局域改性,所以它也可作为纳米光刻的一种技术。激光通过光纤探针对于光刻胶曝光,这方面已取得了许多实验结果。

3 结论

近场光学显微技术,由于其超高分辨率和对样品无损伤等优越特性,应用极其广泛,渗透了物理、化学及生物等各研究领域,并可应用于信息领域中。

在传统光学显微镜中,利用材料的折射率和透镜的曲率将被观察物体放大,以获得其细节信息,信息传递本质上是非对称的,即信息只从物体到达探测器。近场光学显微镜,利用纳米量级的光探针在物体表面附近扫描获取近场信息。在近场区域,收集与探测是完全不同的概念。首先,针尖不能将样品成像,它只收集特定位置的近场光强;其次,近场中的非辐射分量不能传播,它们通过光学隧道效应被转换成辐射力量。所以,探测是对被探测场的微扰。换句话说,远场探测并不改变入射场,近场探测则破坏了被分析的场。由此我们得出结论:近场图像是样品与针尖信息的混合物。换言之,针尖成像样品,样品成像针尖。如果针尖大于被分析物体的细微结构,所得到的像则更多地与针尖的线型特征有关,而不是与样品的拓扑结构相关。虽然在理论上,近场显微镜的分辨率是无限大的,但由于技术上探针尖不能做得无限小,探针亦不能无限接近样品,所以在实际应用中,分辨率还是有限的。

参考文献:

- [1] 贾正根. 光学显微技术探讨[J]. 光电技术, 2001, 42(4): 12-18.
- [2] 张工力, 白永林, 等. 弯曲光纤针尖及其法向力压电探测技术[J]. 光子学报, 2001, 30(1): 47-49.
- [3] 张工力, 白永林, 等. 弯曲光纤纤维针尖的制作方法[P]. 中国专利: 00138036. 2, 2000-12-30.
- [4] 祝生祥. 传统光学显微镜与近场光学显微镜[J]. 光学仪器, 2000, 22(6): 72-78.
- [5] 朱星. 近场光学显微镜[J]. 光学学报, 1999, 27(6): 86-90.
- [6] Y Bai J D White, G Zhang, G Chen, X Hou. Simple and convenient nonoptical shear force sensor for shear force and near-field optical microscopes[J]. Appl Phys Lett, 1999, 75(18): 2731-2733.