

# 近场光学扫描显微术

杨国权 张泽渤 王刚 解思深

80年代初期,人们对物理现象的观察和理解,经历了一场大变革.这场变革的标志,就是新一代成象系统的诞生.近场光学显微镜就是这个家族的最新成

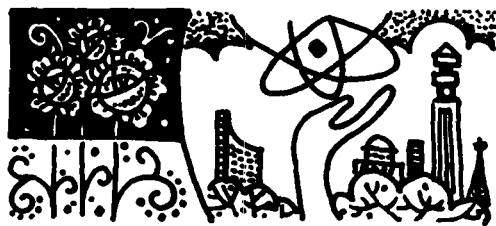
员.如同它的兄长,扫描隧道电子显微镜和原子力显微镜等一样,它使人们用新的眼光观察物理世界.

众所周知,常规显微术有许多优点.例如非介入、可靠、快速、廉价和易操作等.它的缺点是受瑞利判据的限制,分辨率不可能小于亚波长量级.分辨率 $r > 0.61\lambda / \text{nsin}\theta$ ,式中 $r$ 为常规显微镜物镜所能分辨开的两个物点间的最小距离, $\lambda$ 为照明光源波长, $n$ 为物方折射率, $\theta$ 为入射孔径角.

为了提高分辨率,人们曾采用各种补偿技术,但是往往都以牺牲上述优点为代价.于是,能否在保持上述优点的情况下使分辨本领显著提高,就引起了人们的极大兴趣.80年代初期诞生的近场光学扫描(NFOS)显微术,就是这样一个研究领域.它以探测非辐射场为基础,突破了衍射极限,把光学分辨本领提高到前所未有的尺度.这为光盘存储和读取密度成万倍的提高等方面的应用,创造了先决条件.

## 一、近场光学扫描的基本研究内容

近场光学扫描的主要内容是研制近场光学扫描显微镜.目前在国际上提出并在实验室研制成功的,有大同小异的几种方案.其中的一个实例是将整个装置安装在蜂窝蠕变减振台上.经空间滤波器-望远镜组合系统选模和扩束后的 $\text{Ar}^+$ 激光束1,被焦距( $f=50\text{mm}$ )可微调的准直仪2聚焦在石英纤维尖3的顶端透明微孔4上.透过微孔4的激光照射被分析的样品,样



品固定在沿 $xy$ (水平)方向可调节的样品架5上.微孔4与样品之间的距离控制在纳米范围,由 $z$ (竖直)方向压电定位器6调节,它固定在电机驱动的测微器

载物台7上,通过隧道信号8及 $z$ 方向控制器9控制,按照信号电压与移动距离为 $0.15\mu\text{m}/\text{V}$ 进行调节.样品的水平定位由 $xy$ 方向扫描器10及 $xy$ 方向传感器11完成,它受 $xy$ 方向控制器12及斜波发生器13支配.透过微孔4和样品5的光波,携带着样品的信息进入普通显微镜物镜14,它的放大倍数为40,数值孔径为0.6.从物镜14出来的光束通过光阑15(排除杂散光),由光缆16传输到光电倍增管17.它的输出电流 $I(x, y)$ 同时被 $xy$ 记录仪18和模拟象存储器19接收,前者给出扫描线20,后者给出TV灰度图21.用此装置,也可以通过物镜14用眼睛直接观察样品.近场光学扫描显微镜的设计很类似于扫描隧道电子显微镜的设计.

在上述装置中,石英纤维尖3的长度为8mm,横截面积为 $2 \times 2\text{mm}^2$ ,顶部加工成圆锥形,纤维尖的侧面镀铝膜,圆锥顶尖的铝膜加工掉,形成透光微孔4,纤维尖从底部到圆锥顶尖通光.微圆孔4的直径之典型尺寸为10nm.视其使用方法或功能,石英纤维尖3可称为探针或天线.实验中,纤维尖对样品进行扫描,扫描范围为 $50 \times 50\mu\text{m}^2$ .在扫描整个样品表面的过程中,微孔与样品表面的距离不超过5nm.这个距离必须控制在纳米尺度内.控制方法以光学隧道效应为佳.目前的控制已经做到了高度稳定和相当迅速,并且可以重复操作.

此类装置的分辨率达到50-100nm是没

有困难的.通常,对反射式,可达 70nm;对透射式,可达 20nm.获得更高的分辨率也是可能的.例如采用镀铝单模光纤,圆锥顶尖压成透明孔所构成的探针,分辨率可达 12nm.对于采用耦合晶体的装置,分辨率已达 5nm,理论分辨率甚至可达 1nm 以下.

分辨率是个受多种因素影响的极其复杂的问题.NFOS 分辨本领如此之高,其关键部件和技术,就是探针及其上微孔的尺寸,以及微孔与样品间距离的控制与自动调节.这正是 NFOS 研究中的核心问题.关于纤维尖的研制,国际学术界提出了多种途径.中国科学院物理所有关研究人员在这方面开展了深入细致的研究工作,并取得了很大进展.

## 二、基本原理

衍射极限限定,任何常规成像过程之分辨率都为  $\lambda/2$  量级,在可见光区,即为 200—300nm.那么,近场光学扫描为什么不受此限制呢?最基本的原理是,近场光学扫描所探测的场是非辐射场.

物体受到光波照射后,理论上,从麦克斯韦方程组可以推导出,物体反射、透射或衍射的光波均分为两种成分:一是能向远处传播的成分;一是限制在物体表面  $xy$  上,离开物体表面 ( $z > \lambda$ ) 就按指数规律很快衰减为零的成分,这就是众所周知的隐失波,其典型的场结构为

$$U(x,y,z,t) = A(x,y,z)\exp[-i(k_x \cdot x + k_y \cdot y)]\exp(-\alpha_z)\exp(i\omega t)$$

这种场的性质与其赖以存在的物体表面材料有关,依实体物质之存在而存在,离开物体表面到了自由空间就消失了.衰减系数  $\alpha$  由材料性质及其空间结构决定,材料细微结构的尺度愈小,  $\alpha$  值愈大.

由于这种光波只限制在物体表面上,不可能向远处传播,故称它所对应的场为非辐射场.根据海森堡不确定性关系及傅里叶分析,可以推导出,能沿物体表面传播的隐失波,其传播矢量  $k$  沿物体表面的两个分量  $k_x$  和  $k_y$  之模,可能大于总传播矢量之模  $|k|$ ,即  $|k_x|$  (或  $|k_y|$ )  $> |k|$ .因此,隐失波含有物质空间结构的高频信

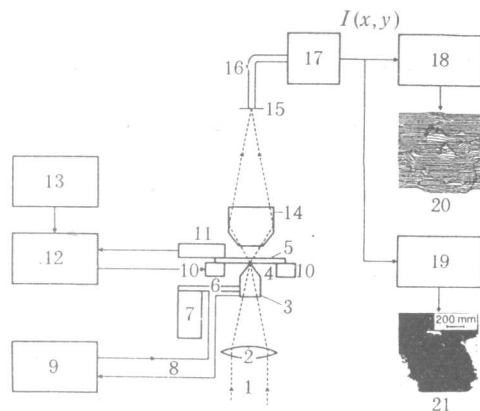


图 1 近场光学扫描显微镜框图

- 1.Ar<sup>+</sup>激光束 2.准直仪 3.镀铝石英纤维尖 4.微孔 5.样品架 6.压电定位器 7.载物台 8.隧道信号 9.z 方向控制器 10.xy 方向扫描器 11.xy 方向定位传感器 12.xy 方向控制器 13.斜波发生器 14.显微物镜 15.光阑 16.光缆 17.光电倍增管 18.xy 记录仪 19.模拟象存储器 20.扫描线 21.TV 灰度图

息.这是电磁辐射与被照物体相互作用所共同决定的.这个结果正是 NFOS 具有亚波长分辨率的关键.

为了区别起见,人们把不被限制在物体表面而能在空间传播的波称为传播波.把它所对应的场称为辐射场.

习惯上,把隐失波存在的(纵向)空间称为近场;而把离开近场直到无限远的空间称为远场.定量上,近场为离物体表面的距离  $z \ll \lambda$  的区域,譬如几个纳米;远场为  $z > \lambda$  的区域.近场区,光场可能会发生剧烈的局部变化,到了远场,这种变化就消失了.远场是常规仪器(例如普通显微镜、望远镜等)可以探测的场.

E.Wolf 和 M.Nieto-Vesperinas 的理论研究进一步指出,入射在极限物体(维度小于  $\lambda/2$ ,例如上述的探针尖)上的光束,总要转变成传播场和隐失场两部分;入射场本身可以是传播场,亦可为隐失场.把这个理论应用于扩展物,可以推知,入射在由细微结构(尺度小于  $\lambda/2$ )组成的扩展物上的光束,入射场也应转换成传播分量和隐失分量两部分,前者能朝常规探测器传播,后者则限制在物体表面上.传播波

携带物体结构的低频信息,遵守瑞利判据.隐失波携带物体结构的频率信息,它不遵守瑞利判据.因此,如果能探测到隐失波,就可以绕开瑞利判据,克服衍射壁垒的限制,达到提高分辨率的目的.NFOS正是建立在探测非辐射场基础上的新一代成像系统.所以,如何探测隐失场,就成了NFOS所面临的首要问题.

隐失场的探测必须在极不容易达到的空间范围内进行.这就意味着,要推翻传统的探测观念,把放在远离物体或光源处的集光器放在与其相距半个波长以内的距离.或者粗略地说,在光波尚未来得及传播时,集光器就已经把它捕获了.采用光学隧道效应,把合适的介质材料置于隐失场中,这个隐失场将转化为传播场.隐失场携带的信息同时也转化成传播场中的信息,于是就可用常规方法探测了.

例如,把前述的很细锐的介质尖置于隐失场中,尽管这种场不能传播,但是它能激发介质尖,被激发的介质尖将发射辐射,传播出去,就是传播波.于是,隐失波就转化为可测量的传播波.通过光纤,把它传输到适当的探测器,例如光电倍增管.另一方面,若把光束注入到圆锥形单模光纤中,传出的光与样品表面相互作用,产生的隐失波再被同一个尖(部分地)接收,可获得反射(显微)象.为了使物体成二维象,必须使圆锥纤维尖扫描物体表面.

可以看出,近场显微术包括两个相继转换过程:入射光波(可以为传播波,亦可为隐失波)被物体结构转换成隐失光波;继之,该隐失场再被纳米聚光器转换成传播场.

### 三、光学隧道效应

技术上,怎样做才能把隐失场转化成传播场,从而达到分辨样品微小结构( $< \lambda/2$ )的目的呢?利用光学隧道效应,是行之有效的办法.

以著名的牛顿实验为例,如图2所示.波长为 $\lambda$ 的可见激光束1,垂直入射在等腰直角三棱镜A的一个直角面上,在斜面3发生全内反射.把与A相同的另一棱镜B置于A附近.若两棱镜斜面之间的间隔 $d \gg \lambda$ ,譬如 $d = 1 \mu\text{m}$ ,就

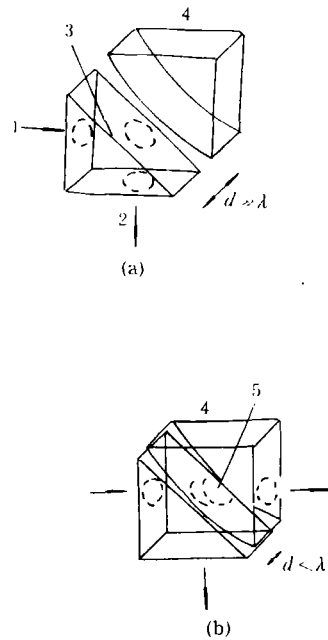


图2 牛顿实验

1 激光束 2 棱镜A 3 全内反射  
4 棱镜B 5 全反射被抑制

观察不到全反射有什么变化.但是,若 $d < \lambda$ ,将观察到光似乎被棱镜B捕获,全反射遭到破坏,有光从B透出.透过棱镜B之光强依赖于 $d$ .进一步,若把B换成斜面微凸的棱镜,如图2(b)所示,使棱镜A与B的斜面相切,预期切点处会有光从棱镜B透出.实验观察表明,结果不仅如此,实际上透光区域远比两棱镜的接触区域大.这说明,当光学元件置于本该全内反射的区域附近( $d < \lambda$ )时,全内反射将被干扰,光会越过两个界面之间的间隙,进入第二个棱镜.这就是光学隧道效应.这个效应早已获得实际应用,例如薄膜波导激光器中抽运光的注入及激光输出,都采用类似的耦合方式.

本质上,光学隧道效应是一种量子效应.但是,定性上,完全可以不涉及任何量子机制,按照光的经典电磁理论,即从麦克斯韦方程组就可以得到解释.只要光场存在于棱镜A斜面的内表面上,按照边界条件的连续性,光场就必然存在于外表面上.这种场能沿表面传播,在垂直于表面的方向上迅速衰减为零,即上面谈到的

隐失波.在  $d \ll \lambda$  的条件下,第二个棱镜 B 的功能是把隐失波引出来,转化成传播波.显然,牛顿实验中的棱镜可以推广到其他光学元件.只要把合适的介质材料置于隐失场中,根据连续性边界条件,这个隐失场将转化为传播场,于是就可用常规方法测量了.上述纤维尖扫描样品的的方法,就是依据这一原理,实现非辐射场的探测,从而获得常规方法根本无法达到的极高分辨率.

#### 四、近场光学扫描引发的其他高科技研究

近场光学扫描显微术有许多优点,例如,(1)近场光学扫描显微镜的分辨率可达 20nm,甚至更高,已经接近高压扫描电子显微镜;(2)近场光学扫描显微镜的价格将比高压扫描电子显微镜便宜;(3)可以直接在空气、液体等自然条件下研究生物标本等样品;(4)与扫描隧道电子显微镜不同,近场光学扫描所分析的材料不限于导体,并且给出的信息是光学信息,可以直接供视觉观察.等等.因此,在许多情况下,近场光学扫描有可能取代高压扫描电子显微镜.

由于上述诸多优点,近场光学扫描可望在生物学、电子工业等领域获得重要应用.例如,

无需在真空条件下,就可以研究活细胞之化学成分分布.再如,在显微平板印刷术中,可以用来辨认直到 50nm 范围内的小物等等.近场光学扫描已经被用于观察单个分子,分子可被重复探测和空间定位到  $\lambda/50$ ,并且可以确定每个分子偶极子的方向.通过改变波长和偏振态,还可以用近场光学扫描提供存储数据的新方法.近场光学扫描在光信息存储方面的应用,很可能使它扮演信息高速公路领域的一个重要角色.由于近场光学扫描的分辨本领极高,可能使现有光盘存储密度成万倍地增长,这很可能引起光盘存储的重大变革.

在光谱学、荧光术、化学和半导体技术等学科领域,近场光学扫描也会得到广泛应用,特别是对其中纳米尺度的研究.根据近场光学扫描的原理及优点,它有可能在显微镜高技术领域掀起新的研究热潮,开拓出显微镜家族中前所未有的许多新品种,研制出适用于诸多领域的各式各样的新型显微镜.

从基础理论方面来看,通过近场光学扫描还能进一步研究近场行为,深刻揭示目前尚不清楚的近场的物理实质.

- 她用物理的情趣,引我们科苑揽胜;
- 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

### 欢迎订阅《现代物理知识》

双月刊,国内邮发代号 2-824,国外代号 BM609,每期定价 1.50 元,全年 9.00 元.

- ◆《现代物理知识》创刊于 1989 年元月,是一份中、高级科普杂志,侧重于介绍现代物理知识、物理学前沿的最新成果与发展动态和有关物理学的新技术及其应用.
- ◆《现代物理知识》由中国科学院主管,中国科学院高能物理研究所主办,科学出版社出版,国内外发行,各地邮局均可订阅.
- ◆本刊编辑部办理邮购:每期 2.00 元,全年 11.00 元,尚有 1992—1994 年各年合订本,每本 15 元; 1995 年合订本,每本 20 元,均含邮费、包装费.
- ◆“现代物理知识与教学现代化”增刊(1994),16 开,200 页,定价 6.50 元(含邮资),由本刊编辑部办理邮购,欲购者请汇款至:100039 北京 918 信箱“现编部”收.
- ◆本刊 1996 年增刊——《现代物理知识与教学现代化》,16 开本,320 页,定价 20 元,1996 年 6 月出版,欢迎预订!