

扫描近场光学显微镜的原理与有源光纤探针

顾书龙

(巢湖学院科技处 安徽 238000)

传统的光学显微镜是以光学透镜为主体,利用透镜能将物体放大成像的功能而制成的。一般地,单级透镜能将物体放大几十倍,级联使用可达到千倍以上。制造放大倍数更大,分辨率更高的显微镜系统将遇到许多不可逾越的技术上的困难。从根本上说,光的衍射效应限制了光学显微镜进一步提高分辨率的可能性。根据瑞利判据,光学成像系统的分辨率 $\delta_r \geq 0.61\lambda/n \cdot \sin\theta$, 其中 λ 为光波波长, $NA = n \sin\theta$ 为光学成像系统的数值孔径,对于单透镜,它等于透镜的直径与焦距的比值。由此可见,提高分辨率的方法,一是使用更短的波长,二是制造更大数值孔径的光学成像系统。前者在可见光范围内没有多少改善的余地,后者也受到许多技术

上的制约。

上世纪 80 年代以来,随着科学与技术向小尺度与低维空间的推进与扫描探针显微技术的发展,在光学领域中出现了一个新型交叉学科——近场光学。近场光学对传统的光学分辨极限产生了革命性的突破。新型的扫描近场光学显微镜(SNOM——near-field scanning optical microscope)的出现使人们的视野由入射光波长一半的尺度拓展到波长的几分之一,即纳米尺度。在扫描近场光学显微镜中,传统光学仪器中的镜头被细小的光学探针所代替,其尖端的孔径远小于光的波长。当把这种亚波长探针放置在距离物体表面一个波长以内,即近场区域时,可以探测到纳米光学信息,而这些精细结构信息仅仅

一直颇有兴趣。实验表明, $1\mu\text{m}$ 波长的自由电子激光是具有最低大气吸收系数的激光器,它可大大缓解舰载激光器碰到的“热晕”问题,其波长可调性和高功率运行的潜力,可满足海军未来舰载武器系统的要求。目前,他们研制成功的由超导射频加速器驱动的 FEL 波长为 $3.1\mu\text{m}$, 其平均输出功率达到 1.7kW (原指标为 1kW), 激光脉宽 1Ps , 重复频率 75MHz , 不久后, $0.1\text{—}10\mu\text{m}$ 波长的 FEL 的平均功率将达到 10kW , $0.2\text{—}1\mu\text{m}$ 波长的 FEL 将超过 1kW , 波长调谐范围 $0.2\text{—}60\mu\text{m}$ 。最近,研究人员又设计了“点火反馈再生放大器”,将产生平均功率高达 200kW 的 FEL (在杰裴逊实验室在该领域取得进展之前,最大工作功率只有 10瓦)。

在发展大功率武器用 FEL 的同时,研究人员也在开发小功率 FEL 的中间应用,如研制更适合通信用的激光器和检验硅片中的杂质,2000 年美国防预算拨款 1 千万元给杰裴逊的 FEL 计划,研究利用 FEL 从地面向卫星传输能量。除美国外,法国、日本、俄国、德国、英国、中国及意大利等 10 多个国家纷纷开展 FEL 的理论研究及实验研究,已建成 FEL 装置 40 多台,还有 40 多台在建设中。另外,科学家们利用 FEL 作光源在固体物理、材料科学、表面科

学、化学、医学、分子生物学等方面已做出了一批有意义的成果。

3. 自由电子激光发展趋势

(1) 向短波方向发展 由于技术上的困难,目前建成的自由电子激光器主要工作在远红外与红外区。随着技术的不断发展,特别是加速器技术上的进步,FEL 将不断向短波(真紫外、软 X 射线)方向推动。

(2) 提高峰值功率及平均功率 这主要是出于军事目的(比如定向能武器和军事通信)。

(3) 发展小型化专用装置及工业应用 目前,美国、日本等国的许多著名公司都在积极研究经济实用的专用 FEL 装置。

(4) 提高功率转换效率 目前,FEL 的能量转换效率还很低($10\% \text{—} 20\%$),因此,无论从科学实验、工业应用还是军事目的,都亟待提高总功率转换效率。最新研究表明,将射出的无用电子束送入减速装置回收其能量,回收率可达 95% 。

自由电子激光从出现至今刚刚经历了 20 个年头,尚处于发展的初期阶段,技术还不成熟,但 FEL 性能上无可比拟的优点,越来越引起科学界、军事界、医学界的高度重视。已成为科学技术领域最活跃的领域之一。

存在于表面的非辐射场内。

1981 年瑞士的 IBM 苏黎世研究中心的宾尼和罗雷尔制造成功了世界上第一台扫描隧道显微镜 (STM), 极大地提高了观测的灵敏度, 其横向分辨率达到 0.01nm, 纵向分辨率达到 0.001nm, 比传统的电子显微镜提高了两个数量级。这一成果很快地被应用到光学领域里, 极大地推动了扫描近场光学显微镜的诞生和发展。这两种高空间分辨率的原理很相似: STM 是基于隧道电子的探测, 而 SNOM 是探测隧道光子。同时, 美国康奈尔大学的贝茨格等也制成了用微管 (micropipette) 作探针的近场光学显微镜。随后, 各种各样的扫描近场光学显微镜在世界各地制造出来, 并逐渐走向成熟, 广泛地应用于许多微观光学现象的观测上。

1. 扫描近场光学显微镜的成像原理

1.1 传播场与隐视场

电偶极子散射场的一般表达式在球坐标系中可写成:

$$E = E_R i_R + E_\theta i_\theta \quad (1)$$

$$H = H_\phi i_\phi \quad (2)$$

其中 i_R 、 i_θ 、 i_ϕ 是球坐标的单位向量, 而 E_R 、 E_θ 、 E_ϕ 分别为:

$$E_R = 2[P(t)/R^3 + P'(t)/cR^2] \cos \theta \quad (3)$$

$$E_\theta = [P(t)/R^3 + P'(t)/cR^2 + P''(t)/c^2 R] \sin \theta \quad (4)$$

$$H_\phi = [P'(t)/cR^3 + P''(t)/c^2 R] \sin \theta \quad (5)$$

上面各式中的 $P(t)$ 是描述电磁辐射从 O 点到 R 点的推迟势, $P'(t)$ 、 $P''(t)$ 代表推迟势对时间的一次和二次导数。当 R 很大时, 即 R 远大于波长 λ 的远场区域时, 我们将得到如下的简化式:

$$E_R = 0 \quad (6)$$

$$E_\theta = H_\phi = [P''(t) \sin \theta] / c^2 R \quad (7)$$

当考虑在近场区域时。即 $R \leq \lambda$ 时, 式 (3)、(4)、(5) 中的 $1/R^2$ 、 $1/R^3$ 项均要保留, 从式中可以看出近场区域的电磁场沿 R 方向以 $1/R^2$ 、 $1/R^3$ 幂次趋于 0, 在小于波长的区域内就衰减为 0, 这部分场正是扫描近场光学显微镜赖以工作的隐视场。

由上述的偶极子辐射理论, 不难推知光照射到可被看做偶极子集合的物体上后, 通过感应偶极矩的辐射, 入射光场必转化成两部分: 可以传播到远场区域的传播场 (即辐射场) 和局域在物体表面近场区域的隐视场 (即非辐射场)。按傅里叶空间频谱的语言来

说, 远场 (传播场) 对应于物体空间频率的低频部分, 而近场 (隐视场) 对应于物体空间频率的高频部分, 它包含了物体的超精细结构的信息。显然, 如果能够探测到局域于物体表面几个纳米尺度范围的隐视场, 我们将得到关于物体的超精细结构的信息。所以, 在常规的光谱学研究中, 由于光信息收集器 (一般为透镜) 远离近场区域, 所以他们只能收集如同式 (6)、(7) 中所描述的包含在远场部分的信息。由于扫描近场光学显微镜是利用放在离样品几个纳米距离内的光纤探针, 进行样品信号的收集或对样品进行近场照明, 因而就能够探测到包含在隐视场区域的信息。

1.2 光学隧道效应

由于非辐射场分量具有隐视波的特征, 惟一的探测方法是利用光学隧道效应。

近场光学现象并不是近年来才发现的现象。早在 300 多年前, 牛顿所实现的抑制三棱镜全内反射实验利用的就是一种典型的近场光学现象。当年, 牛顿没能对他的实验作出正确的解释。只是在人们建立了光的电磁理论以后, 牛顿的实验才从近场光学角度得到合理的解释。因此, 牛顿应当是第一个设计将隐视场转换为传播场实验的人。

现在的做法是将光纤探头引入非辐射场内, 产生光学扰动, 从而把局域在物体表面的信息转换出来, 这即是光学隧道效应, 或光子隧道效应。这个效应可用麦克斯韦电磁理论来解释: 把探针针尖作为电磁波散射中心, 收集探针区域的散射电磁场能流。因针尖尺寸很小, 可以看成一个电偶极子。根据瑞利散射理论, 可以得到探针收集到的光信息的总强度, 基本上是与电偶极矩模数的平方成正比。可见, 探针能线性地响应被探测信号, 传输给接收元件, 将隐视场转变为传播场。

也可以直观地用棱镜表面边界条件的连续性解释。既然在棱镜内表面有场的存在, 在与其相邻的外表面也必然有场的存在, 这个场必然在垂直方向迅速消失。因而, 如果用合适的介电探针“浸入”隐视场, 由于同样的连续性边界条件, 探针也会将隐视场转变为传播场。

然而, 由于扰动机制涉及到棱镜与场的相互作用, 牛顿的实验方法并不能满足纳米尺度的近场光学探测, 因此我们必须考虑在转换过程中的衍射效应。

在描述衍射物体和隐视场的相互作用机制的众多方法中, 正如前面所提到的, 最简单的方法是假设探针的针头相当于一个偶极子, 即一个基本的散射

源。当把这个偶极子放入非辐射场中,它被激发而产生包括传播分量和非传播分量的电磁场,其传播分量被远处的探头所探测到。

1.3 近场探测分辨率

由此可见,扫描近场光学显微镜主要接收到隐视波,所以其分辨率不受经典衍射极限的限制,而常规光学显微镜只能接收到传播波,所以其分辨率受经典衍射极限的限制。根据电偶极子衍射理论分析,我们可得出如下主要结论:

1. 传播场在零点($R \rightarrow 0$)是有限的,其衍射形成一端利斑。传播波的角分布在偶极子 P 垂直的方向。

2. 视场在零点是发散的,主要集中在零点附近,其衍射斑点的尺寸随离零点的距离变得很小,远小于瑞利斑。隐视场存在于远场区域但相对传播场来说很小,它的角分布在 P 平行的方向。

很显然,以上结论证实:扫描近场光学显微镜主要接收到隐视波,所以其分辨率不受经典衍射极限限制,而常规光学显微镜只能接收到传播波。因此,要使分辨率不受经典衍射极限限制,就要探测非辐射场,即必须把探头放在距样品一个波长以内。形象地说,在场尚未传播之前用探头捕捉它。然而,这样的方案引出新的问题。

首先,探头必须能准确地放在物体表面纳米尺度而又不碰撞。这个问题可以用扫描探针显微镜常用的压电调节方案。其次,由于探头与样品间距如此之近,没有任何常规的成像系统可以用来成像,因而只能采用逐点成像的方法。即首先被纳米尺度的局部光信号收集,将其转变为电流,或者再发射到自由空间,或者以波导的方式将其传播到探测系统,如光电倍增管或光电二极管。最后再将逐点采集的信息扫描成为二维图像。

2. 扫描近场光学显微镜的构造和有源光纤探针

典型的扫描近场光学显微镜由探针、信号传输元件、信号接收元件、信号反馈元件、扫描控制元件以及微机处理信号系统等组成。其中反馈、扫描控制及信号处理系统与扫描隧道显微镜或者原子力显微镜(AFM)的作法有相同之处。不同的是,由于探测的是光场,所以使用光纤等作为信号传输元件,使用光电倍增管作为信号接收元件。衡量一台扫描近场光学显微镜质量优劣有许多指标,其中最重要的一项是探针。

通常的 SNOM 光纤探针都是作为传输和探测光场的被动介质,自身并不发光。一般而言,为了提高

SNOM 系统的分辨率,需要探针的针尖直径越小越好。然而,随着针尖直径的减小,探针的传输效率急剧下降。例如,若耦合进光纤的激光功率为 1.0mW,当光纤探针锥尖直径为 100nm 时,其输出功率为 10nW,衰减为 10^{-5} ;当锥尖直径为 50nm 时,输出功率为 0.1nW,衰减为 10^{-7} 。

SNOM 无源光纤探针的制备方法分为两大类:化学腐蚀法和熔拉法。采用熔拉法制备的光纤探针,其表面非常光滑,所需时间很短($<1\text{min}$),但针尖直径较粗(约几百纳米);采用化学腐蚀法制备的探针具有较小的针尖直径(可达几十纳米)。但所需时间较长($\approx 80\text{min}$),因而造成针尖表面有许多微小的腐蚀坑而引起光的散射损失。

已有人采用熔拉法和腐蚀法相结合研制出一种新型的有源光纤探针。利用掺 Er^{3+} 光纤中产生的放大自发辐射(ASE),制作成 ASE 光纤探针。它既具有很光滑的表面,又具有较小的针尖直径。还实现了用 980nm 波长泵浦的掺 Er^{3+} 光纤的 SNOM 有源探针,测量了探针的 ASE 输出特性。这种新型有源探针具有较高的传输效率和较宽的光谱范围,它不仅可以提高输出的信号光子流,还可以减小系统的相干噪声,从而提高了图像的光学质量。

如今,扫描近场光学显微镜不仅可以用于常规的表面形状、结构及折射率等的观测,还可以用于探测波导的模式、样品的荧光光谱、拉曼光谱以及单分子的物理、化学性质。此外,利用近场光学显微镜的探针,还可以操纵、控制原子的行为,实现激光冷却原子的功能。在这同时,还出现了许多专门用途的近场光学显微镜,如用于探测金属表面的等离子体振荡的近场光学显微镜,探测磁性样品表面形貌的磁光近场显微镜等。为了降低量子器件、介观体系发光过程中的热噪声,低温 SNOM 也应运而生。在低达几十 K 的条件下,热运动造成的噪声被抑制,光谱的分辨本领与发光效率可以有很大的提高。由于低温近场光谱仪同时涉及低温、高真空及微弱光信号探测等极端条件,其研制极具挑战性。另外,扫描近场光学显微镜能利用光学观测的无损、原位探测的特点,将重点应用于生物学领域内有关生物组织、细胞和生物大分子观测。

作为诞生才 20 多年的一门新兴学科技术,扫描近场光学显微镜应用在微电子学、光电子学、高密度信息存储和生命科学领域,其前途无量,必将推动 SNOM 在我国的发展。