

# 利用小孔衍射实现光学显微镜的超高分辨率

肖体乔 陈建文

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

系统地介绍了利用小孔衍射( $a \ll \lambda$ )实现光学显微镜的超高分辨率的原理及实验进展, 阐述了与该显微术的工程应用密切相关的小孔衍射的近域场理论, 简要说明了这一显微原理的优越性。

为探索微观世界的奥秘, 人们在不断地改进光学成像装置, 以提高其分辨本领。我们知道, 受衍射的限制, 成像装置的分辨本领是由式  $\lambda/N.A.$  决定的, 其中  $\lambda$  为成像光波长,  $N.A.$  为物镜的数值孔径。实践证明, 用减小成像光波长来提高分辨率是一种行之有效的办法。波长很短的电子显微镜已能分辨  $1 \text{ \AA}$  量级的微细结构。如果波长是给定的, 比如说我们只能用某一可见光波长成像, 有没有别的办法来提高显微装置的分辨本领呢? 回答是肯定的。

受物镜有限孔径的限制, 传统光学显微镜的空间分辨本领不可能超过  $\lambda/2$ , 但这一 Abbe 障碍是可以逾越的。1966年 Lukosy<sup>[1]</sup>用互补空间滤波器使这一分辨率极限向前推进了整整两倍。遗憾的是, 这一方法的潜力太小, 因为在所要转换的空间频率上光波会变成倏逝波。尽管 Nassenstein<sup>[2]</sup>提出了一个天才的设想: 用倏逝波照明物体, 再用全息术把含有被照物信息的倏逝波记录下来, 但在实现这一光学系统时遇到了难以克服的困难。

对上述系统稍作分析就可以发现, 它是把所有物平面上的信息同时转换到像平面上去, 亦即所谓的“平行处理系统”。在这些系统中, 同时处理的信息太大也许是影响分辨率进一步提高的原因。把照明范围缩小在要分辨的区域可简单地实现信息的提取, 从而提高分辨率。当然我们不能用聚焦的方法来照明, 因为即便是衍射极限的光斑尺寸也只是照明光的波长量级。在这里, 半径远小于照明光波长的小孔衍射为我们提供了一个有力的工具。用良导体屏上小孔的透射光照明样品, 并对整个样品表面扫描, 物理

可得到线度远小于波长的超高分辨率。这为提高光学显微镜的分辨本领开辟了一条新途径。本文介绍了利用小孔衍射获得超高分辨率的原理及实验进展, 并较为系统地阐述了与提高分辨率密切相关的小孔的近场衍射理论。

## 一、原理和进展

1966年, O'Keefe<sup>[3]</sup>率先提出了这一显微原理的设想。由小孔衍射理论可知, 近场范围内小孔的透射光为小孔所准直。用该透射光照明样品, 使被照明区在近场范围内成像, 从而得到尺度同孔径相比拟而又远小于入射光波长的点像。在 X-Y 记录仪上记录下这一像点的信号强度。扫描样品, 并控制样品和小孔每次的相对移动量小于孔径, 即可得到与孔径相比拟的超高分辨率。

六年以后(1972年), E. A. Ash 和 G. Nicholls<sup>[4]</sup>首次在微波波段得到了  $\lambda/60$  的超高分辨率。

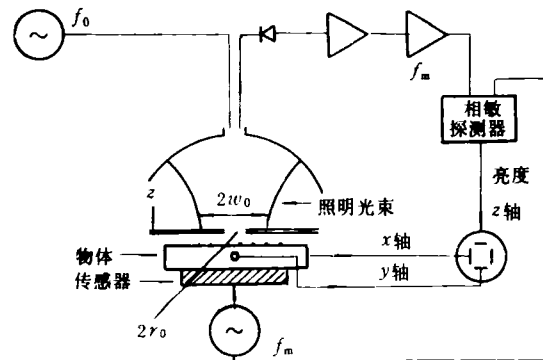


图1 扫描显微镜装置图

$f_0$  照明光频率;

$f_m$  振动频率;  $W_0$  照明光束半径;  $r_0$  孔半径

分辨率,其实验装置见图1.开放腔中的微波通过小孔入射到样品表面.让样品以频率  $f_m$  振动,含有样品信息的物光就得到调制.该调制光再经小孔返回到谐振腔中.用选频器分析从谐振腔另一端出射的微波,滤掉背景波.保留的信

号经低噪声放大器放大后,记录在示波器或 X-Y 记录仪上.扫描样品即可得到整个样品表面的超高分辨率的图像.该实验所用的微波波长为3cm,所能分辨的最小线宽为0.5mm.也就是说,得到了  $\lambda/60$  的超高分辨率.

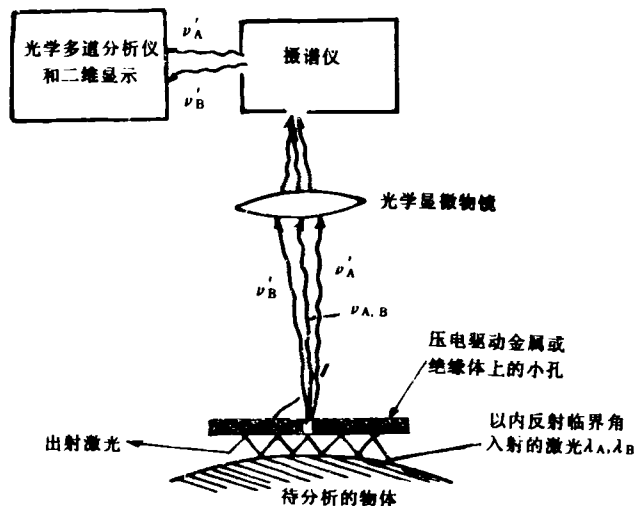


图2 用于实现空间分辨率为500 Å 的扫描光学显微镜的方法图解

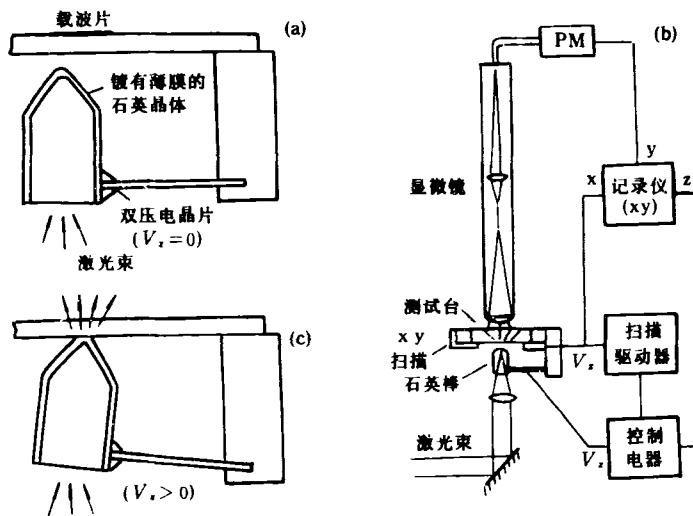


图3 光学听诊器 (a)尖端形成前的装置图;(b)整体装置图;(c)小孔的形成

1983年,IBM 苏黎世研究小组的 A. Murray<sup>[5]</sup>等人在他们的文章里详述了制作上述小孔的工艺过程,他们使用了当时刚发展起来的电子束制版(Lithograph)技术.在此基础上,A. Lewis<sup>[6]</sup>等人又分析了实现空间分辨率为500 Å ( $\sim \lambda/10$ )的扫描光学显微镜的可行性,并构思出了这一显微镜的原理图(见图2).接着,

他们又做了进一步的工作,实现了上述超高分辨率.与此同时,Cornell 大学研究小组的 D. W. Pohl<sup>[7]</sup>等人又独辟蹊径,用加电压使金属膜发生塑性形变从而透光的办法扫描样品(图3),得到了  $\lambda/20$  的分辨率.他们用的入射光为波长4880 Å 的可见光,分辨出了线度为250 Å 的细节.1986年和1988年,上述两个小组又更深入地

研究了这方面的课题<sup>[8]</sup>. 小孔衍射是获取超高分辨率的关键, 了解小孔衍射的机理并熟悉小孔衍射理论是很有必要的.

## 二、理 论

基尔霍夫衍射理论仅在观察点到屏的距离及孔径都远大于入射光波长时适用. 孔径与波长相比拟或远小于波长的衍射(小孔衍射)只能由麦克斯韦方程组及其边界条件直接求解.

小孔衍射的理论研究很早就开始了. 1897年, Rayleigh<sup>[9]</sup>就研究了小圆孔的衍射问题, 他认为衍射场的解析解可写成波数  $k$  的幂级数的形式. 1944年, Bethe<sup>[10]</sup>用标量势函数近似方法求出了幂级数的首项, 从而得到圆孔衍射场的远场解. 1950年, Bouwkamp<sup>[11]</sup>, Meixner, Andrejewski<sup>[12]</sup>等人进一步研究了平面波正入射的小圆孔衍射问题, 并精确解出了它们的衍射近场和远场.

迄今为止, 只有小圆孔衍射和椭圆孔衍射两种情形是可以精确求解的, 其他形状或任意形状小孔的衍射虽无法求出其精确解, 但也找到了一些近似方法. 下面主要介绍与工程应用密切相关的小孔衍射的近域场理论, 然后简要叙述小方孔衍射的近似处理方法.

### 1. 近域场理论

1986年, Yehuda Leviatan<sup>[13]</sup>研究了良导体平板上的小孔衍射的近场结构, 并解决了两个对工程应用十分重要的问题, 给出了小孔偶极近似的适用范围, 从而指出源或物应放在离小孔多远处才不致影响衍射场的准静态分布. 计算结果表明, 电磁场透过小孔后有一定的准直范围, 超过这一范围场将很快弥散开.

在具体的计算过程中, Leviatan 用的是小圆孔模型, 但这也能在一定程度上反映出任意形态小孔衍射的某些共性. 用等效原理把小孔对入射电磁场的衍射作用等效成两个磁流源的辐射, 即可精确求解出透射场的解析表达式, 进而分析场的结构, 得出各种结构参数. 其中, 假想磁流源的表达式可由小孔平面处磁场  $H$  的物理

切向分量的连续条件求得.

将上述方法求得的衍射场与偶极场、近似偶极场比较就可以发现:

$0 \leq Z < 10a$  时, 偶极近似不成立;

$10a \leq Z < \lambda/2$  时, 偶极近似成立;

$Z \geq \lambda/2$  时, 远域偶极近似成立;

其中  $Z$  为小孔的轴向,  $a$  为孔半径.

作玻印亭(Poynting)矢量的  $Z$  分量( $S_z$ )对孔平面的分布又可以看出, 场透过小孔后, 在纵向距离为孔半径的范围内被基本局限在孔域. 也就是说, 透射场为小孔所准直. 准直深度约等于孔半径. 超过这一深度后, 场将以指数形式发散.

鉴于小孔衍射近场问题的重要性, TAKASHI NAKANO 和 SATOSHI KAWADA<sup>[14]</sup>最近又对这一问题作了进一步的数值分析, 并得到了一些很有意义的结果. 他们根据 Bethe<sup>[10]</sup>的小孔衍射理论推导出衍射近场中玻印亭矢量的解析表达式, 再根据这一表达式进行数值分析, 并考虑了光束斜入射的情形. 下面是他们得到的结果.

计算表明, 不管是正入射还是斜入射, 衍射近场都被局限在纵向距离等于小孔半径的范围内. 计算机绘出的玻印亭矢量的三维分布图也很直观地显示出这一点. 从而, 进一步证实了 Leviatan<sup>[13]</sup>的结果.

在衍射效率上, 斜入射情形透过的能量要大些. 根据 Bethe 的理论, 等效磁流源  $K(r')$  是  $H_0$  和  $(r' \times E_0)$  两部分的贡献, 其中  $r'$  为孔平面上点的坐标. 正入射时小孔内的电场  $E_0$  只有平行分量, 它对  $K(r')$  的贡献为零, 因而它的衍射效率较斜入射的要小.

另外, 在“45°斜入射”时绘出透射场玻印亭矢量沿  $y$  轴(孔的径向)的分布图<sup>[14]</sup>就可以看出, 能量流动的路径是一条曲线. 也就是说, 能量从小孔流出后又折了回来. 这对制作反射型近场扫描显微镜是有利的.

### 2. 小方孔衍射的近似方法

实验中所用的小孔往往是不规则的, 研究小方孔衍射并将其与小圆孔衍射进行比较是很有必要的.

与圆孔衍射相比,小方孔衍射的处理要复杂些.只考虑远场时,可直接用 Bethe<sup>[10]</sup>的有效偶极矩概念分别求出小孔的电磁极化率就行.如果感兴趣的是近域场,那就得把衍射场求出来.为解决这一问题,人们已作过许多探索.得出的方法之一,是用“偶极矩法”列出电磁场的微分方程求解. R. F. Harrington<sup>[15]</sup>, Rahmat-Samii<sup>[16]</sup>等人在这方面做了大量的工作.另一方法是,选择一个合适的试探函数来代替孔径场分量,代入三个互相耦合的积分方程求解出衍射场.这一工作主要是由 Kieburz<sup>[17]</sup>完成的.这里提到的两种方法在数学推理上比较严格,但计算颇繁.下面介绍一种较为简便的方法.

R. Edward English 和 Nicholas George<sup>[18]</sup>用分析推理的方法,求出了小方孔衍射场  $E_x$  的解析表达式,并对解的合理性作了分析和验证.

按 Copson<sup>[19]</sup>方法,衍射场  $E^d$  可表示为矢量势  $F$  的旋度形式:

$$E^d(\mathbf{r}) = \pm \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \mathbf{F}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

其中  $F$  被定义为如下形式:

$$F(\mathbf{r}) = \frac{\epsilon}{2\pi} \iint \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}') \frac{\exp(ikR)}{R} dx' dy',$$

$\hat{\mathbf{n}}$  为孔面法向矢量, (2)

$$R = [(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{1/2},$$

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

$\mathbf{r}' = \mathbf{r}'(x', y', z')$  为孔面上的矢径.

从上式可以看出,只要求出孔面上  $E(x', y')$  的表达式,就可以解出衍射场.

根据 A. Sommerfeld 和 R. F. Millar<sup>[20]</sup>等人的计算,无限长狭缝衍射可表示为

$$E_x(x') = \sum_{n=0}^{\infty} \beta_n [a^2 - x'^2]^{n-1/2}$$

(缝平行于  $y$  轴), (3)

$$E_x(y') = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n [a^2 - y'^2]^{n-1/2}$$

(缝平行于  $x$  轴), (4)

$a$  为缝的半宽度,  $\beta_n$  为展开系数,  $(x', y')$  为缝上点的坐标,  $n=0$  表征缝边界的奇异性.

两条狭缝垂直相交,其交面为一方孔,因而可以认为小方孔的衍射解具有如下形式:

$$E_x(x', y') = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \beta_{nm} [a^2 - x'^2]^{n-1/2} \cdot [a^2 - y'^2]^{m-1/2}. \quad (5)$$

取上式的前三项并整理得

$$E_x(x', y') = \left( \frac{a^2 - y'^2}{a^2 - x'^2} \right)^{1/2} \cdot [B + C \frac{x'^2}{a^2} + D \frac{y'^2}{a^2}] (ika), \quad (6)$$

其中  $B, C, D$  为待定常数.把这一表达式代入 Copson<sup>[19]</sup>方程,求出  $B, C, D$  三个系数,即可得到  $E_x$  的完整的表达式.再经进一步的处理并作图就可以看出,仅在孔角附近很小的区域内  $E_x$  不能表征实际场,因而可以认为此解是合理的.如果取更高阶的项进行计算,求得的  $E_x$  解可以正确描述场在孔角附近的行为.另外,将上述解与圆孔解比较还可以发现,它们的形式是相似的.

光学显微镜结构简单、操作方便,与电子显微镜等相比有其优越性.它可以在自然状态下观察样品,且对样品无任何损伤,是生物学研究的重要工具.传统光学显微镜已不能适应现代科学技术发展的要求,研究超高分辨率光学显微镜有其实际意义.到目前为此,利用小孔衍射实现光学显微镜的超高分辨率的实验已有很大进展,在微波波段已达到  $\lambda/60$ ,在可见光范围内也达到了  $\lambda/10 - \lambda/20$ .相应的小孔衍射理论也在逐步完善,现已形成一个较为系统的小孔衍射理论.为使该装置尽快投入使用,进一步的理论和实验研究是必要的.

- [1] W. Lukosy, *J. Opt. Soc. Amer.*, **57**(1966),1463.
- [2] H. Nassenstein, *Optics Comm.*, **2**(1970),231.
- [3] J. A. O'Keefe, *J. Opt. Soc. Am.*, **46**(1956),359.
- [4] E. A. Ash and G. Nicholls, *Nature*, **237**(1972),510.
- [5] A. Muray et al., *J. Vacuum Sci. Technol. B*, **1**(1983),1091.
- [6] A. Lewis et al., *Ultramicroscopy*, **13**(1984),227.
- [7] D. W. Pohl et al., *Appl. Phys. Lett.*, **44**(1984), 651.

- [8] D. W. Pohl et al., *J. Microscopy*, **152**(1988),583.
- [9] Lord Rayleigh, *Phylos. Mag.*, **43**(1897),259.
- [10] H. A. Bethe, *Phys. Rev.*, **66**(1944),163.
- [11] C. J. Bouwkamp, *Philips Res. Rep.*, **5**(1950),321.  
C. J. Bouwkamp, *Philips Res. Rep.*, **5**(1950),401.
- [12] V. J. Meixner et al., *Ann. Phys.*, **7-6**(1950),157.
- [13] Y. Leviatan, *J. Appl. Phys.*, **60**(1986),1577.
- [14] TOKASHI NAKANO et al., *Journal of Modern Optics*, **39-3**(1991),645.
- [15] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, Macmillan, New York, (1968).
- [16] Y. Rahmat-Samii et al., *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-22**(1974),608;**AP-25**(1987),180.
- [17] R. B. Kieburz et al., *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **AP-10**(1962),663.
- [18] R. Edward English et al., *J. Opt. Soc. Am. A*, **5-2**(1988),192.
- [19] E. T. Copson, *Proc. Roy. Soc. London A*, **202**(1950),277.
- [20] A. Sommerfeld, *Optics*, Translated by O. Laporte and F. Moldauer, Academic, New York, (1954), 273; R. F. Millar, *Can. J. Phys.*, **38**(1960),38; See Ref. [17],668.

## 光学模式识别和人工智能处理器

张钧屏

(中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

介绍采用光学信息处理方法实现人工视觉功能的研究工作.以提取光学特征和相关方法为主要特点的光学模式识别已经得到发展,但是还不能完全解决目标识别中比例尺、偏移、旋转、畸变、强干扰、部分阻挡、多目标等一系列问题.目前正努力发展光学人工智能处理器,包括符号处理、联想存储和处理、决策网络等.

### Abstract

The study on the artificial vision function using the optical information processings is described. Optical pattern recognition characterized by optical feature extraction and correlation has been developed. However, the problems on the scale-, shift-, rotation-, distortion-invariants, interference, partial shadowing and multi-target for object recognition have not been solved satisfactorily.

Recently, the optical artificial intelligence processors, including symbol processor, associative memory and processor, and decision network, have been developed acceleratedly.

当今世界,向信息社会迈进,图像已成为传递信息的极其重要的方式.电视广播、气象预报、资源勘测、军事侦察、医学诊断等应用,图像比比皆是.目前,对于图像信息的处理和运用,大多数是利用数字电子学实现的.数字电子计算几乎成了图像信息处理的同义语.虽然它确实是一项成熟的技术,而且解决了一批重要的问题,但是应用的广泛无法掩盖技术本身的局限性.电子计算机很难完成图像处理与识别的物理

许多任务.像地震分析、全球气象预报、军事情报分析、三维空气动力学分析等时间性很强的应用,它们要求对二维图像进行实时的分析.目前世界最大型的快速计算机对此也苍白无力.用计算机模仿人的智能进行图像识别,是很有效的.然而它是在对图像数据实施浩繁的运算之后实现的.由此而提出的计算机容量和速度的要求,大到无法想象.一幅简单的图像,100×100像元,计算机实施最普通的傅里叶变换(即