

# 位相恢复法重现软 X 射线同轴全息图\*

杨绍光 谢行恕 赵永飞 贾成芝

(中国科学技术大学基础物理中心, 合肥 230026)

**摘 要** 在物平面和全息平面上分别施加限制条件, 实现了同轴全息图的位相恢复重现, 基本消除了孪生像的干扰。提出了一种软 X 射线同轴全息实时成像的方案。

**关键词** 软 X 射线, 位相恢复法, 同轴全息。

## 1 引 言

在自然状态(不固定、不染色、不超薄切片、大气环境)之下, 对活的生物样品进行高分辨率显微成像, 观察细胞的亚显微结构, 是一个引人入胜的领域。“冰窗”波段软 X 射线的自然衬度机制为高分辨率显微成像提供了新的途径<sup>[1, 2]</sup>, 软 X 射线显微术受到了众多科学家的关注。全息术能够提供物体的三维信息, 在软 X 射线显微术中占有很重要的地位。由于软 X 射线的特点, 到目前为止, 只有同轴全息和傅里叶变换全息被应用于软 X 射线领域<sup>[3-5]</sup>。同轴全息实验不需要其它光学元件, 因而光路的调节比较容易, 同时对软 X 射线相干长度的要求也相对较低, 有很大的优越性。为了充分利用软 X 射线的空间相干范围提高分辨率, 人们采取近场同轴全息方式。这种方式得到的全息图, 必须进行显影、放大等很多后续处理过程, 并且其重现像会受到孪生像的严重干扰。人们使用不同的方法消除孪生像的影响, 而利用计算机进行数字重现因其特别的优越性而受到重视<sup>[6]</sup>。本文实现了同轴全息图的位相恢复法重现, 并探讨了软 X 射线同轴全息实时成像的可能性。

## 2 同轴全息的物理模型

假定物体为振幅型平面物体, 利用平面波垂直照射物体形成全息图。取物体的振幅透过率为

$$T(x, y) = 1 - a(x, y), \quad |a(x, y)|^2 \ll 1$$

在物体后距离  $z$  处记录全息图, 则全息面上光的复振幅分布为

$$U(x, y) = [1 - a(x, y)] \odot h_z(x, y)$$

$$h_z(x, y) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left[\frac{jk}{2z}(x^2 + y^2)\right] \quad (1)$$

\* 国家自然科学基金和合肥国家同步辐射实验室开放课题资助项目。

收稿日期: 1997-10-16; 收到修改稿日期: 1997-12-25

其中  $j^2 = -1$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长,  $\odot$  表示卷积运算,  $(x, y)$  表示位置坐标, 全息记录介质经过曝光和线性冲洗, 得到全息面上光强分布的信息:

$$|U(x, y)|^2 = 1 + [a(x, y) \odot h_z(x, y)]^2 - a(x, y) \odot h_z(x, y) - a(x, y) \odot h_z^*(x, y) \quad (2)$$

(2) 式中前两项近似常数, 其中  $h_z^*(x, y)$  是  $h_z(x, y)$  的复共轭。直接重现时入射光垂直照射全息图, 光的振幅透过率与(2) 式成正比。忽略常数因子, 在距离全息图  $z$  处光的复振幅分布为

$$\{1 + [a(x, y) \odot h_z(x, y)]^2\} \odot h_{-z}(x, y) - a(x, y) \odot h_{-z}(x, y) - a(x, y) \quad (3)$$

(3) 式中前面一项提供背景光, 最后一项重现原物, 中间一项形成孪生像。直接重现同轴全息图时, 重现像不可避免地要受到孪生像的干扰。产生这一现象的根本原因是在全息图的记录过程中, 虽然物波的振幅和位相信息由于物波与参考波的干涉而保留下来, 但是全息光场  $U(x, y)$  的位相在记录过程中丢失了, 全息图只记录到全息光场的强度信息, 即只有  $|U(x, y)|^2$  被记录下来。

### 3 位相恢复算法

根据卷积理论可以得到

$$u(x, y) \odot h_z(x, y) = [1 - a(x, y)] \odot h_z(x, y) \odot h_z(x, y) = [1 - a(x, y)] = T(x, y) \quad (4)$$

(1) 式描述了全息光场的形成过程, (4) 式描述了全息光场形成过程的逆过程, 两式描述了全息光场的复振幅分布  $U(x, y)$  与物平面上振幅透过率  $T(x, y)$  之间存在的对应关系。

现在从全息图出发重现原物体。全息光场的强度分布[即  $U(x, y)$  模的平方]为已知, 如果再得到其位相分布, 就可以重现原物体而不受孪生像的干扰。除了全息光场的强度分布, 还知道物体是振幅型的, 即物平面上光的复振幅是实数。根据这两个已知条件以及(1) 式和(4) 式, 可以利用数字计算的方法逐步恢复全息光场的位相, 同时重现原物体。

具体重现过程通过多次循环来实现, 每一个循环包含两个主要步骤, 即: 第一步, 从全息平面到物平面的光的传播:

$$\{|U(x, y)| \exp[\mathcal{Q}_{n-1}(x, y)]\} \odot h_z(x, y) = T_n(x, y) = A_n(x, y) + jB_n(x, y)$$

其中  $T_n(x, y)$  为物体的  $n$  级近似。物平面上要求满足物体振幅透过率为实数的限制, 只保留物体  $n$  级近似的实部, 即令  $B_n(x, y) = 0$ 。

第二步从物平面到全息平面的光的传播:

$$A_n(x, y) \odot h_z(x, y) = U_n(x, y) = |U(x, y)| \exp[\mathcal{Q}_n(x, y)]$$

$U_n(x, y)$  为全息光场的  $n$  级近似。全息平面上要求满足已知的光强分布, 即保留幅角  $\mathcal{Q}(x, y)$ , 模  $|U_n(x, y)|$  用  $|U(x, y)|$  代替。

上面两步完成了从全息平面到物平面, 又从物平面到全息平面的一个循环。第一个循环时可令  $\mathcal{Q}(x, y) = 0$ 。将这样的循环进行下去可以得到物体的各级近似  $T_1(x, y)$ ,  $T_2(x, y)$ ,  $T_3(x, y) \cdots$  和全息光场的各级近似  $U_1(x, y)$ ,  $U_2(x, y)$ ,  $U_3(x, y) \cdots$ 。循环中物平面上施加了振幅型物体的限制, 全息平面上要求满足已知的光强分布。在这两个限制条件下, 从

全息图出发进行全息重现到全息记录的不断循环,可以逐步恢复记录全息图时所丢失的全息光场的位相信息,从而可以重现原物体。实际上这个方法是利用恢复全息光场的位相信息做桥梁,同时实现了物平面上和全息平面上光场的重建。物平面上被重新恢复的信息来自全息平面上已知的强度分布,全息平面上被重新恢复的信息来自物平面上已知的位相信息(物体是振幅型的)。当两个平面上的光场都被基本恢复以后,全息平面到物平面以及物平面到全息平面的两个光的传播过程就会自洽,物体就可以得到较好地重现。

## 4 模拟实验

利用计算机模拟实验可以验证上述理论的正确性。根据抽样定理将数据离散化,利用计算机,可以实现第一步描述的全息重现过程和第二步描述的全息记录过程。数字模拟实验的结果如图 1 所示,图 1(a、b、c、d)分别是原物、全息图、直接重现像和经过 100 次循环位相恢复法重现像。从图 1(c)可以清楚地看到孪生像的干扰,而图 1(d)的重现像的质量相对好得多。

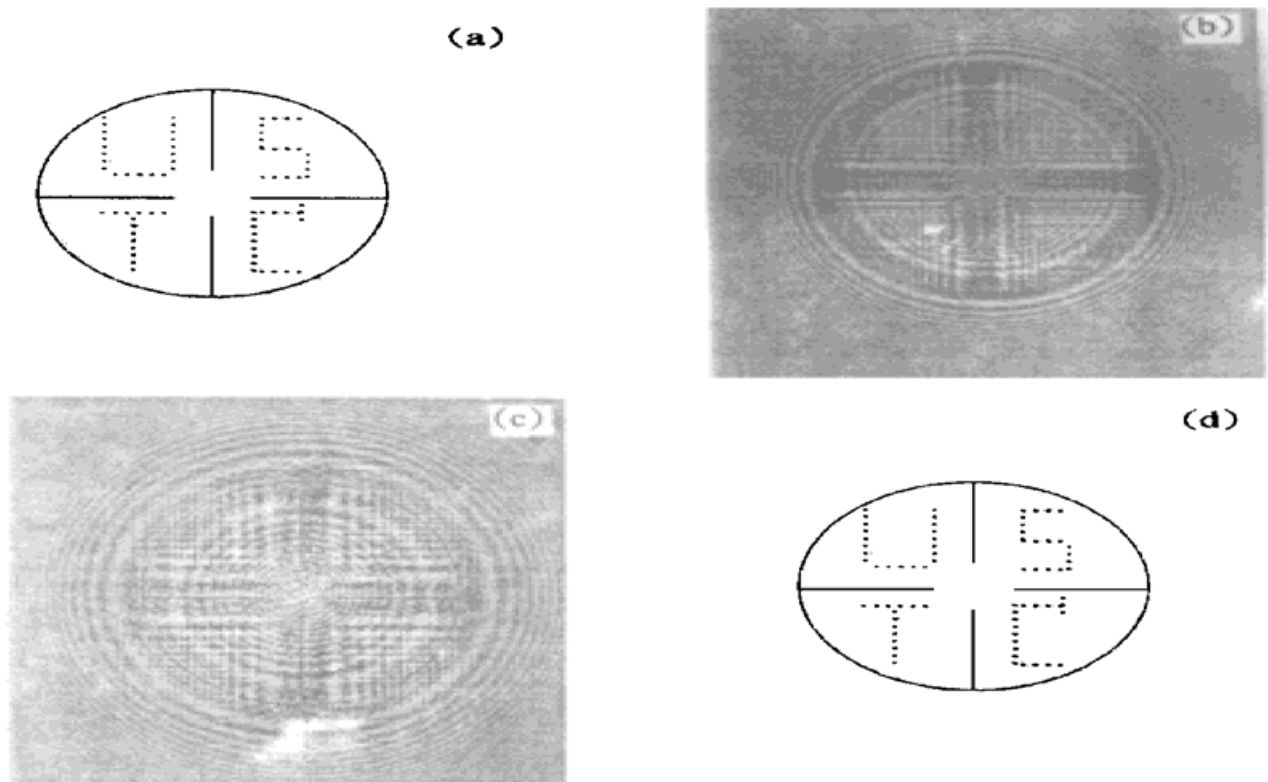


Fig. 1 Computer simulation of phase retrieval reconstruction of in-line hologram. (a) Object, (b) Hologram, (c) Direct reconstruction, (d) Phase retrieval reconstruction (100 times)

得到重现像后,有必要对重现像的质量进行判断。在一般情况,知道全息图的强度分布而不知道原物体的具体细节。现在在全息面上对重现结果进行判断。按原来产生全息图的条件,将重现后得到的物体重新产生全息图(简称副全息图)。重现像越接近于真实物体,副全息图就越接近于原全息图;如果重现像完全等同于原物体(显然这是不可能的),两个全息图也应该完全一致。现在定量考察循环次数对重现效果的影响,对第  $n$  次循环本文计算了:

$$E_n = \left[ \frac{\sum [I_n(x, y) - I(x, y)]^2}{N} \right]^{1/2}$$

其中  $N$  表示像素点总数,  $n$  表示循环次数,  $\Sigma$  表示对所有的像素点求和,  $I(x, y)$  表示原全息

图上点的强度分布,  $I_n(x, y)$  表示第  $n$  次重现后物体的副全息图上  $(x, y)$  点的强度分布。从直接重现像开始循环, 将直接重现过程规定为第零次循环, 得到  $E_0$  的大小。以后每次循环得到的重现像的质量可以用  $E_0$  做标准进行衡量。定义相对误差

$$R = 100 \times \frac{E_n}{E_0}$$

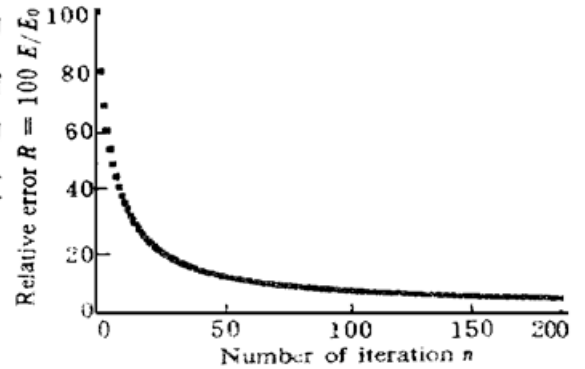


图 2 是前面模拟实验结果的  $R-n$  关系曲线。从图 2 可以发现, 最初的几次循环重现像的质量迅速提高, 数次以后图像质量经过一个较缓慢的改善过程, 经过几十次循环后图像的质量基本保持不变, 可以停止循环了。从实际观察随循环次数的增加图像质量改善的情况也得到了相同的结论。

Fig. 2 The relationship between  $R$  and  $n$  in the computer simulation

## 5 软 X 射线同轴全息实时成像的设想

软 X 射线全息术的研究正在蓬勃发展, 作者也正积极开展了这方面的实验研究, 并且已经取得了初步的结果<sup>8, 9</sup>。现在一般使用高分辨率 X 射线

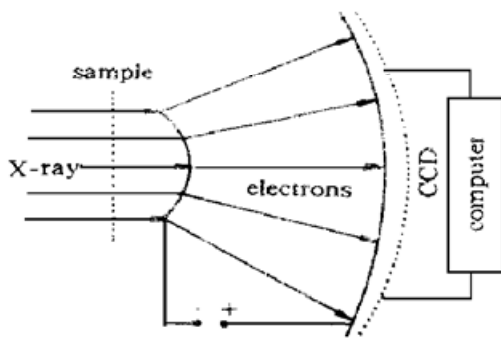


Fig. 3 Schematic diagram of the real time reconstruction of soft X-ray in-line hologram

光刻胶记录同轴全息图, 然后通过显微镜放大, 将放大后的全息图进行光学重现; 或者利用数字化扫描仪将放大的全息图转换成离散型数据, 进行数字重现。这一过程是非常漫长的, 中间过程会引入实验误差, 影响成像质量, 给实验带来不利的影 响。笔者设想, 如果能够使同轴全息图实时放大和重现, 将有利于软 X 射线同轴全息成像的实验研究。如软 X 射线接触成像中采用的放大装置<sup>7</sup>, 设想利用某种光阴极材料做成球面记录全息图, 当透过样品的软 X 射线照射记录材料时材料中的电子被激发形成光电子, 光电子的分布携带了全息

图的信息, 被激发出的电子在放大电场的作用下打在荧光屏上, 形成放大的全息图(如图 3)。放大后全息图的光强分布可以利用 CCD 摄像机进行快速数据采集, 然后利用计算机进行数字重现。在前面的同轴全息图用位相恢复法重现时(如图 2 所示)发现, 程序循环 10 次左右所恢复的图像就比较清楚了, 而利用奔腾 133 计算机循环 10 次大约需要 6 分钟。还可以将效果较好的全息图数据文件传递到其它计算机上进行更进一步的数据处理。当然这种设想的实现还需要解决很多技术问题, 但如果实现了同轴全息的实时重现必将促进软 X 射线同轴全息的进一步发展。

**总 结** 记录介质只能记录光的强度信息, 全息光场的位相在记录过程中被丢失了。本文利用位相恢复法, 设计了计算机程序, 通过多次循环恢复丢失的位相。循环中物面上和全息面上分别加上限制条件, 使位相被逐步恢复。数字模拟证明设计的程序是正确可行的。设计了一种软 X 射线同轴全息实时重现的实验方案, 如果将其实现, 利用本文的程序可以在较短的时间内对全息图进行数字重现。

## 参 考 文 献

- [1] Solem J C, Baldwin G C. Microholography of living organisms. *Science*, 1982, **218**(4569) : 229~ 235
- [2] 谢行恕. 生物样品的软 X 射线显微成像. *物理学进展*, 1992, **12**(3) : 333~ 358
- [3] 陈建文, 徐至展, 朱佩平等. X 射线全息术. *物理学进展*, 1995, **15**(2) : 125~ 147
- [4] Howells M, Jacobsen C, Kirz J *et al.*. X-ray holograms at improved resolution: a study of zymogen granules. *Science*, 1987, **238** : 514~ 517
- [5] McNulty I, Kirz J, Jacobsen C *et al.*. High-resolution imaging by Fourier transform X-ray holography. *Science*, 1992, **256** : 1009~ 1012
- [6] Liu G, Scott P D. Phase retrieval and twin-image elimination for in-line Fresnel holograms. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1987, **4**(1) : 159~ 165
- [7] Hersch G. Biological imaging with a new type of soft X-ray microscope. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(2) : 1367~ 1369
- [8] 杨绍光, 谢行恕, 贾成芝等. 软 X 射线同轴全息实验. *科学通报*, 1998, **43**(5) : 489~ 491
- [9] 杨绍光, 谢行恕, 贾成芝等. 生物样品软 X 射线全息图拍摄成功. *光学学报*, 1998, **18**(6) : 832

## Phase Retrieval Reconstruction for Soft X-Ray In-Line Hologram

Yang Shaoguang    Xie Xingshu    Zhao Yongfei    Jia Chengzhi

(Center for Fundamental Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(Received 16 October 1997; revised 25 December 1997)

**Abstract** By using the constrains on the object plane and on the hologram plane, we have realized the phase retrieval reconstruction of in-line hologram. It has proved to be effective by computer simulation. A new design for real time reconstruction of soft X-ray in-line hologram has been proposed.

**Key words** soft X-ray, phase retrieval, in-line hologram.