

文章编号: 0253-2239(2003)02-0150-05

数字滤波法再现电子全息图*

刘 诚¹ 刘志刚¹ 程笑天¹ 薄 峰¹ 王 勇¹ 朱健强¹ 姜锦虎²

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(² 苏州大学物理系, 苏州 215006)

摘要: 在分析电子全息图特性的基础上, 提出频谱滤波法对电子全息图进行数字再现, 以解决其再现像之间相互重叠的问题。此方法首先将数字化的电子全息图进行傅里叶变换得到全息图的空间频谱, 然后对此频谱进行滤波处理并作反傅里叶变换得到一幅新的全息图, 最后再用一般的数字再现法对此新的全息图进行再现。用这种方法, 可以很方便地得到不受干扰的再现实像。

关键词: 全息术; 电子全息; 电子显微镜; 数字再现; 空间频谱滤波

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

1 引 言

电子全息技术是为了提高电子显微镜的分辨率而被提出的^[1]。在理论上它可以打破电子透镜的像差所带来的各种限制, 大幅度提高电子显微镜的分辨率, 具有非常重要的实际意义。但由于其实验操作中含有化学处理过程和相干光再现操作, 所以电子全息的实验程序很繁琐, 以至到目前为止其实际应用还不多见。从理论上讲, 电子全息的这些缺点完全可以通过近年来逐步完善起来的数字全息技术来很好地解决^[2], 但由于受到电子技术发展水平的制约, 数字全息技术本身在过去很长时间里一直没有太大的进展, 有关电子全息数字化的研究工作当然更少。随着电子技术的进步及个人计算机性能的大幅度提高, 数字全息技术近年来已经逐步完善起来并在一些方面取得了应用, 电子全息图的快速数字化记录也已经不存在任何技术上的困难。近年来, 我们在电子全息的数字化研究中发现, 虽然一般的离轴电子全息图满足普通全息图的再现像分离条件, 可以用传统的光学再现方法对它们进行再现, 但在绝大多数情况下用数字计算的方法直接对电子全息图进行再现时却得不到相互分离的再现像, 即普通的数字再现方法对一般电子全息图而言并不适用。为此本文对电子全息图的数字再现问题进行了研究并提出用数字频谱滤波的方法来解决再现像重

叠问题。

2 基本原理

2.1 离轴电子全息的记录及再现

离轴电子全息的记录装置一般由普通透射式电子显微镜改装而成, 其记录原理可以用图 1 来简单说明。

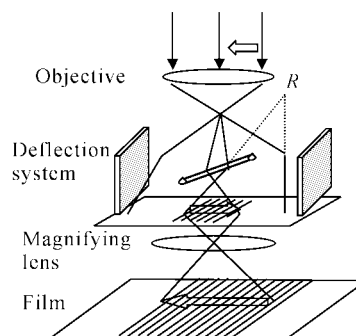


Fig. 1 Ray diagram of the formation of electron hologram

由电子枪射出的电子束经准直后射到被记录物体上, 然后穿过成像电子物镜, 到达电子束偏转区, 偏转区由三个电极组成, 其中两边两块为平板状电极, 中间为一根直径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的细金属丝, 在使用时两块平板电极接地, 中间金属丝加 $50\ \text{V}$ 左右的电压, 经过金属丝两边的电子束由于受到金属丝的正电压吸引而向中间偏转, 在经过偏转区以后二者发生重叠并形成干涉图, 此干涉图经过后续放大后被记录在电子显微镜的底片上。为了便于后续光学处理, 电子全息图的条纹间距一般控制在 $50\sim 100\ \mu\text{m}$

* 国家科委 863-416 资助课题。

E-mail: liucheng96@hotmail.com

收稿日期: 2002-02-08; 收到修改稿日期: 2002-04-10

之间。在拍摄实际电子全息图时,将被拍摄物体放在电子物镜的一侧(图中放于右侧),这样经过偏转区左右两边的两束电子束,左边为物“光束”,右边为参考“光束”。穿过成像透镜左半空间的参考电子束经过透镜汇聚和偏转系统偏转后,相当于从图中 R 点发出(电子的相干长度很小, R 偏离系统轴线的距离要严格控制),所以利用这种装置所得到的电子全息图是“参考光”为球面波的离轴全息图。在有些透射电镜中,电子束偏转装置可以根据要求被做成备用插件,在需要记录电子全息图时只要将其装入即可使用,所以利用透射电镜来记录电子全息图非常方便。

电子全息图的数字再现方法和普通光学再现方法在原理上并无任何区别,为方便讨论二者的区别,现将电子全息图的再现过程用图 2 来简单地示意。图 2 中左边实线代表再现全息图时所用的球面参考光。为了方便比较,记录电子全息图时的物电子束也同时用虚线给出,右边实线部分表示再现时所得到的三束再现光束,从上到下分别形成实像、零级光和虚像。在图中 A 、 B 、 C 三个区域可以分别观测到相互独立的实像、直透光和虚像,即图中所示的全息图满足普通离轴全息的再现像分离条件。

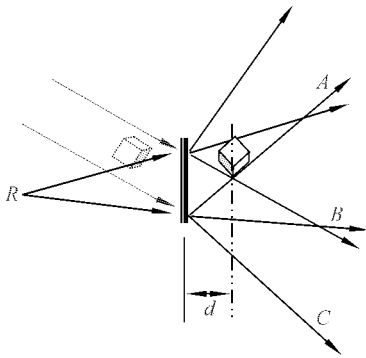


Fig. 2 Diagram of the reconstruction of electron hologram

用数字方法来再现全息图就是计算图 2 中用点划线所标示的实像所在平面上的光的复振幅分布。如果设全息图所在的平面为 $x-y$,再现实像所在平面为 $\xi-\eta$,两平面间的垂直距离为 d ,那么实像所在平面的复振幅分布可用下式中的菲涅耳积分来计算^[2]:

$$\begin{aligned} \psi(\xi, \eta) = & \frac{i}{\lambda d} \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \times \\ & \iint_{(x, y)} R(x, y) I_H(x, y) \times \\ & \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right] \times \end{aligned}$$

$$\exp\left[\frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta)\right] dx dy, \quad (1)$$

式中 $I_H(x, y)$ 和 $R(x, y)$ 分别表示全息图的亮度和全息图平面上参考光束的复振幅分布。在实际运算中由于全息图的亮度是一个离散的数组,所以需要将上式写成离散形式:

$$\begin{aligned} \psi(m, n) = & \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (m^2 \Delta\xi^2 + n^2 \Delta\eta^2)\right] \times \\ & \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} R_0(k, l) I_H(k, l) \times \\ & \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)\right] \times \\ & \exp[i2\pi(km/N + ln/N)], \\ & m = 0, 1, \dots, N-1; n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2) \end{aligned}$$

Δx 、 Δy 和 $\Delta\xi$ 、 $\Delta\eta$ 分别为全息图平面和再现像平面上的采样间隔,它们之间通过下式相联系:

$$\Delta\xi = \frac{\lambda d}{N \Delta x}, \quad \Delta\eta = \frac{\lambda d}{N \Delta y}. \quad (3)$$

2.2 电子全息图特性分析和频谱滤波方法

若图 2 中的参考光束为垂置于全息图平面的平面波,则(1)式中的积分部分可以看作是全息图的亮度分布函数 $I_H(x, y)$ 和一般所谓孔径函数 $\exp\left(-i\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda d}\right)$ 乘积的傅里叶变换。根据傅里叶变换理论,(1)式可改写为

$$\begin{aligned} \psi(\xi, \eta) = & \frac{i}{\lambda d} \exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)\right] \times \\ & \mathcal{F}[I_H(x, y)] \otimes \mathcal{F}\left\{\exp\left[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right]\right\}, \quad (4) \end{aligned}$$

(4)式说明电子全息图的数字再现结果等于全息图的傅里叶频谱和孔径函数的傅里叶频谱之间的卷积。全息图的傅里叶频谱可以用图 3 来示意,图中左右两边两个圆柱分别表示真实像和虚像的频谱,中间部分表示零级衍射的频谱。

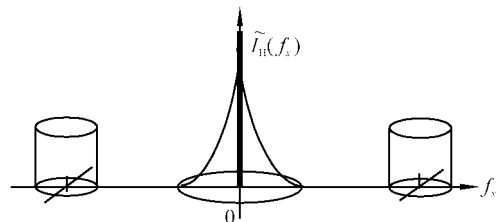


Fig. 3 Spatial spectrum of off-axis electron hologram

根据文献[4],若令 $p(f_x)$ 为孔径函数 $\exp\left[-i\pi \frac{x^2}{\lambda d}\right]$ 的频谱,则 $p(f_x)$ 可用图 4 中的曲线来示意,从图中可以看出,曲线的中部的数值在 $\sqrt{\lambda d}$ 处上下波动,离开中心距离 $2\pi L/(\lambda d)$ 后其数值快

速下降到 0, 其中 L 为全息图的宽度, 总体看来它是一个分布宽度约为 $4\pi L/(\lambda d)$ 的函数。因为在数学上两个函数卷积的宽度等于两个函数宽度之和, 所以要想得到相互分离的数字再现像, 图 3 中的各频谱之间的距离必须大于孔径函数的频谱宽度 $4\pi L/(\lambda d)$ 。由于在全息图宽度一定的情况下 $4\pi L/(\lambda d)$ 的大小随着记录距离 d 的减小而增大, 所以当物体和全息图之间的距离减小到一定程度后, $4\pi L/(\lambda d)$ 的大小将会超过全息图各频谱项之间的间隔, 此时即使全息图的各项谱项之间是彼此分离的, 也不可能得到彼此分离的数字再现像。这就意味着虽然有些全息图可以用普通光学方法很好地再现, 但当用(1)式的数字计算方法来对它们进行再现时却得不到理想的数字再现像。图 2 中所示的就是这种情况, 此时三个再现光束在空间中沿不同的方向传播, 所以在 A、B、C 三个区域可以分别观测到相互分离的再现像。但在点划线所示的数字再现平面上, 再现实像却完全重叠在零级衍射光里, 即数字再现方法所得到的只能是相互重叠的再现像。

在电子全息图中, 由于电子的相干长度非常短(如, 动能为 2500 eV 的电子束在理想情况下其相干长度只有 $1.12 \mu\text{m}$), 所以参考电子束和物电子束的夹角必须尽可能小, 这意味着图 3 中所示各频谱项之间的距离很小。另一方面, 为了获得较高的分辨率, 在电子全息中被观测物体经电子物镜所成的像一般都尽可能地靠近记录胶片, 二者之间的距离一般远小于 $1 \mu\text{m}$, 这说明图 4 中的函数曲线有较大的宽度。所以, 在大多数情况下用(1)式的方法对电子全息图直接进行再现一般不可能得到相互分离的再现像。

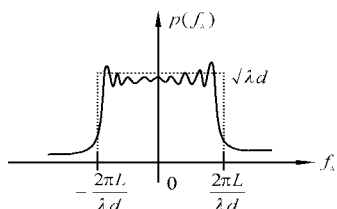


Fig. 4 Spectrum of $\exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda d}\right)$

从图 3 中能够看出, 零级衍射光频谱的宽度大约是物光频谱宽度的 2 倍, 如果能将其去除, 那么剩下的两个频谱项之间的距离将会大大增加, 若此距离大于相应的孔径脉冲函数频谱的宽度, 再现像之间的重叠就可以避免。同样道理, 若将零级衍射光的频谱和虚像的频谱同时去除, 那么就可以确保得

到不受任何干扰的真实像。在传统的相干光信息处理领域, 只要在 $4f$ 系统的焦平面上放置合适的光阑, 这一滤波过程就可以很方便地实现。在数字全息技术中, 可以采用同样的方法来去除电子全息图的零级衍射光频谱和再现虚像的频谱, 只要对需要再现的数字化电子全息图进行傅里叶变换, 在变换所得的结果中将零级衍射光的频谱和再现虚像的频谱去掉, 然后对滤波处理后的全息图进行反傅里叶变换, 得到一幅新的全息图(由于所得到的结果为复数, 所以已经不是一般意义上的全息图), 最后按一般的数字再现方法对此新的全息图进行数字再现。由于新的全息图中不再含有零级衍射光频谱和虚像频谱, 所以再现之间的重叠问题便可以避免。

3 实验验证

本实验在 Hitachi HF-2000 透射电子显微镜上进行。所记录的物体是一个尺寸约为 5 nm 的金晶粒。在记录电子全息图之前, 首先将电子显微镜成像物镜精确调焦, 然后在偏转系统的金属丝上加 50 V 左右的电压, 产生相互干涉的物电子束和参考电子束, 并调整投影电子透镜使其离焦 600 nm 以得到菲涅耳全息图。显微镜的放大倍数为 20 万倍, 所记录到的全息图在图 5 中给出。图中的竖直条纹是参考电子束和透射电子束相干的结果, 条纹间距大概在 $100 \mu\text{m}$ 左右, 全息图的尺寸约 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 。需要说明的是, 记录电子全息图时, 图 2 中的 R 点离开全息图的距离约为几个厘米, 而未经放大的电子全息图的尺寸小于 1 nm , 所以参考光可以近似看作平行光。

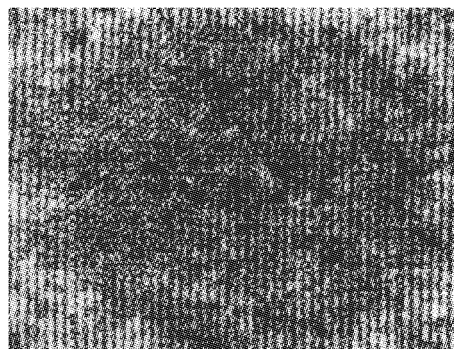


Fig. 5 Digitized electron hologram

对普通 CCD 而言, 单个像元的尺寸在 $10 \mu\text{m}$ 左右, 靶面的总面积大约为 $7 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 所以只要将显微镜的放大倍数调低一半, 普通 CCD 靶面的尺

寸和分辨率完全可以胜任本实验的记录需要。由于 CCD 不适宜直接对电子束进行记录,因此必须将电子束的能量转换成光强,这在显示器技术非常成熟的今天并不是一个困难的问题,甚至只要在 CCD 靶面上涂上合适的荧光粉这个问题就可以得到解决,当然效果要差些。现有的电子全息装置一般都没有预留数字记录接口,为避免对实验设备进行改动,在本实验中并没有对全息图进行直接记录,而是首先采用传统的方法将电子全息图记录在胶片上,然后用扫描的办法将此全息图数字化后输入计算机,并用数字再现方法对其进行再现,全息图的扫描点数为 1000×1000 点。扫描所用时间很短,只有几秒时间。

图 6 中所示的是电子全息图的傅里叶频谱,其中左边虚线框内的为再现实像的频谱,右边框内的为虚像的频谱,中间部分是零级衍射光的频谱。从图中可以看出,虽然三个频谱项彼此靠得比较近,但彼此仍是分离的。按照普通全息的再现像分离条件,用光学方法对此全息图进行再现实肯定能够得到彼此分离的再现实。

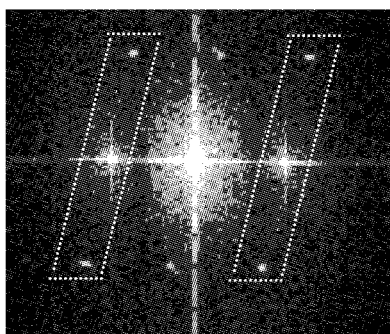


Fig. 6 Fourier transform of the hologram in Fig. 5

图 7 所示的是将图 5 中的电子全息图代入(1)式的数字再现方法所得到的再现结果。从中可以明显看出,再现实像和虚像同时被零级衍射光覆盖,很难从中得到有关被记录物体的任何有用信息。

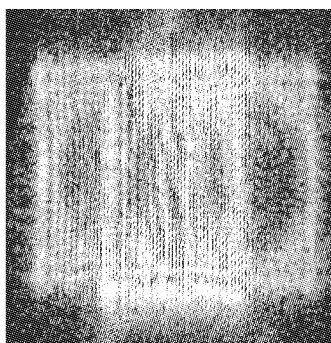


Fig. 7 Reconstructed image with the usual digital method

图 8 所显示的是利用本文提出的数字频谱滤波法所得到的再现结果。从中能够看到,零级衍射光和虚像都被去除,再现实像有很好的对比度。像中间暗影部分为金粒的透射照片。由于金粒右边表面上的点阵结构对入射电子束有较强的衍射作用,所以入射到此表面的电子被大角度衍射,被衍射的电子束由于电子透镜球差的作用没有成像于几何像点,而是偏在距图像中心约 10nm 的上下两边,并部分和原来在该处的电子束发生干涉形成细密的条纹。金粒右表面的像由于电子束被衍射出去而形成为一个暗斑。这正是利用普通电子显微镜进行晶体结构观测时经常遇到的情况,从一个侧面也说明了数字滤波法再现电子全息图的正确性。

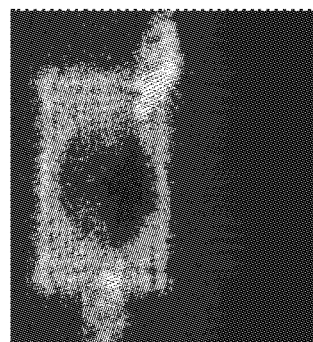


Fig. 8 Reconstructed image with spatial filtering method

结论 由于在电子全息中物电子束和参考电子束的夹角很小,而且物体和全息图之间靠得很近,所以在很多情况下电子全息图虽然可以用光学方法很好地再现,但用一般的数字再现方法对其再现时却不能得到相互分离的再现实。从理论上对此问题进行了分析,并提出用数字频谱滤波的方法来对电子全息图进行数字再现。在进行理论分析的同时给出了相应的实验验证。

参 考 文 献

- 1 Tonomura A. *Electron Holography*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1994. 15~16
- 2 Cuhe E, Bevilacqua F, Depeursinge C. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(5):291~293
- 3 Goodman J W, Wlawarence R. Digital image formation from electronically detected holograms. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**(3):77~79
- 4 Goodman J W. *Introduction to Fourier Optics*. 2nd ed., New York: McGrawHill, 1996. Chap. 8, 17~19

Spatial-Filtering Method for Digital Reconstruction of Electron Hologram

Liu Cheng¹ Cheng Xiaotian¹ Liu Zhigang¹ Bo Fen¹
Zhu Jianqiang¹ Jiang Jinhui²

(¹ *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*
² *Department of Physics, Suzhou University, Suzhou 215006*)
(Received 8 February 2002; revised 10 April 2002)

Abstract: Based on the theoretical analysis of the electron hologram, a spatial filtering method to avoid the overlap of the digital reconstructed images of electron hologram is proposed. In this method, we make Fourier transform of the detected electron hologram and filter the obtained spatial spectrum, then generate a new electron hologram by making inverse Fourier transform of the filtered spatial spectrum. The overlap of the reconstructed images of electron hologram is avoided when the obtained new hologram is digitally reconstructed with the usual digital method.

Key words: holography; electron microscope; electron holography; digital reconstruction; spatial frequency filtering

(上接封四)

3.8 资助来源 所投文章项目受到资助的,应标明资助名称及编号。在审稿结论相同的情况下,符合以下条件的予以优先发表:1)属省、部級以上的重大科技成果、获奖项目和具有明显经济效益的项目(均请在来稿中注明);2)有国家级或省部级基金资助项目的论文。

3.9 投寄要求 所投稿件需一式三份,注明稿件责任联系人姓名、地址、邮政编码、联系电话和电子信箱(用于编辑部通知作者收到稿件),以便联系,以及标明“稿件内容不涉及国家机密”、“此稿无一稿两投”、“作者排名不再随意更改”的证明件(盖章),一并挂号寄往:201800 上海 800-211 信箱 光学学报编辑部(请不要寄交个人,以免延误稿件的受理时间)。

3.10 本刊现已进入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和《万方数据数字化期刊网》,不再另行通知作者,对版权有特殊要求者,请事先声明。

4 审稿程序 论文类稿件收到评审费后分送两位同行评议(必要时需作者修改及复审,作者对于审稿意见应当逐一给出书面回答)、主编终审、择优录用;编辑部自收稿日起4个月内将初审意见函告作者,逾期,作者可另行处理原稿,但需告知编辑部。

5 录用与否 编辑部有权对录用稿件作编辑意义的增删加工。录用稿作者应遵照中国科协有关文件精神,支付适量版面费以聊补期刊的高额亏损。录用稿一经本刊刊登,本刊享有版权,并向作者酌付稿酬、该期期刊一册和抽印本17份。作者如不同意本刊录用刊登稿件由本刊供它刊转载、译载、引摘,务请在投稿时声明。编辑部负责向作者退回不录用稿件及先期收到的版面费。