

电子全息术再现中的若干问题*

陈建文 朱佩平 肖体乔 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

讨论了“冻结”在电子全息图中的位相信息的再现方法. 实验结果表明两次曝光技术不但能直接获取位相信息, 不需要激光再现, 而且能给出定量结果. 这也意味着, 在一次实验中用电子显微镜可以同时获得振幅和位相两种信息.

关键词 电子全息术, 两次曝光, 位相差放大.

1 引 言

电子全息术是一个三步成像过程. 第一步是用电子显微镜的电子波记录或存贮物波的振幅和位相信息; 第二步是对感光的电子全息图进行显影和定影的处理, 这一步对再现像的质量和信量是很重要的. 最后一步是把具有高衍射效率的电子全息图的复制片放置在光学平台上, 再现原始波前. 1978年 Tonomura^[1]把场发射枪引入了电子全息术, 把电子束的亮度提高了几个数量级. 从此, 电子全息术便成为物理学中非常活跃的领域^[2~4]. 虽然人们在精确再现电子全息图方面做了很大努力, 但还存在很多问题.

就目前用马赫-陈德尔(Mach-Zehnder)干涉仪位相差放大^[6~7]的再现方法而言, 在某些情况下, 它仅给出定性结果, 且需要光学平台^[8]. 近来, Lichte^[9]采用计算机再现技术, 获得了原子量级的分辨率. 这对电子全息图的再现是一重大进展, 但是它需要庞大的计算机系统. 本文研究了再现“冻结”在电子全息图中的位相信息的方法, 并且和双曝光技术做了比较. 实验结果表明, 双曝光技术不但能直接获取不需要激光再现的位相信息, 而且能给出定量结果. 这也意味着在一次实验中用电子显微镜可以同时获得振幅和位相两种信息.

2 电子全息图的记录

电子全息图是利用飞利浦 EM400-T TEM 场发射透射式电子显微镜做为电子束源、插入选区孔径平面上的 Mollenstedt-Duker 静电双棱镜作为分束器进行拍摄的^[8]. 图1是记录电子全息图的示意图. 样品室的一半用来放置样品, 另一半用来通过参考电子束, 这样可使参考电子束的波前不受样品的干扰. 静电双棱镜中央的金属丝的正电位使参考电子束和物电子束重叠. 通过两个透镜的放大, 电子全息图便被记录在胶片上. 由于电子全息术中的静电积累效应, 由碳膜支撑的直径为 $0.32 \mu\text{m}$ 的聚乙烯乳剂小球将成为带电体. 为了观察带电聚乙烯乳剂小

收稿日期: 1993年1月5日

* 本工作得到国家自然科学基金资助

球的电位分布,把带电聚乙烯乳剂小球的电场分布作为一个位相物体. 设电子波长和波矢的模分别为 λ_1 和 $k_1 = 2\pi/\lambda_1$, 则物电子束在电子显微镜像面上任一点 (x_i, y_i) 的复振幅可写为

$$A(x_i, y_i) = \exp[ik_1\varphi_1(x_i, y_i)]$$

参考电子束的复振幅为

$$B(x_i, y_i) = \exp[ik_1\varphi_2(x_i, y_i)]$$

$k_1\varphi_1(x_i, y_i)$ 和 $k_1\varphi_2(x_i, y_i)$ 分别为物电子束和参考电子束的位相因子. 在物镜像面的干涉强度分布为

$$I(x_i, y_i) \propto 1 + \cos k_1[\varphi_1(x_i, y_i) - \varphi_2(x_i, y_i)] \quad (1)$$

经过横向放大率为 M 的放大镜,干涉条纹间隔加宽,条纹的空间频率降低. 设 x_h 和 y_h 为全息图平面上的座标,则电子全息图上的强度分布为

$$I(x_h, y_h) \propto 1 + \cos (k_1/M)[\varphi_1(x_h, y_h) - \varphi_2(x_h, y_h)]$$

式中 $x_h = Mx_i, y_h = My_i$. 当电子显微镜工作在标准衍射模、加速电压为 100 kV 时,相应于电子波长为 0.37 nm. 电子全息图是在物镜关闭放大镜聚焦在通常样品平面上进行拍摄的,如图 1 所示. 电子双棱镜的工作电压 $V_f = 15$ V. 曝光时间为几秒钟. 设方程(1)的位相因子为

$$\begin{aligned} \varphi_1(x_i, y_i) &= \varphi(x_i, y_i) + x_i \sin\theta_0 + \delta_0 \\ \varphi_2(x_i, y_i) &= x_i \sin\theta_r + \delta_r \end{aligned}$$

$\varphi(x_i, y_i)$ 是由静电场引起的光程差. θ_0 和 θ_r 分别为物电子束波前、参考电子束波前的法线和物镜像面法线的夹角, δ_0 和 δ_r 分别为物电子束波前和参考束波前的延迟. 再设记录是线性的,经过显影,曝光时的入射强度就和全息图的振幅透射率成正比. 于是,曝光量的变化就在 $T - E$ 曲线的线性区域之内. 此外,设调制传递函数 MTF 扩展到足够高的频率,能记录入射束的全部空间频率. 因此,显影胶片一级衍射的振幅透过率可写为

$$T \propto \cos\{i(k_1/M)[\varphi(x_h, y_h) + x_h(\sin\theta_0 - \sin\theta_r) + (\delta_0 - \delta_r)]\}$$

3 电子全息图的再现

3.1 电子全息图的位相差放大

如上所述,在电子全息图中同时记录下物波的振幅和位相信息. 可是记录介质只能对强度做出反应. 因此,必须把位相信息转变为强度变化才能记录下来. 实现这一转变的常用方法是干涉术. 电子全息图中位相信息的再现是在马赫-陈德尔干涉仪上进行的,如图 2 所示. 当一束激光进入干涉仪后,被分成两束激光分别以略微不同的方向照射全息图. 因为是像面全息图,所以每一束入射光将在全息图平面上产生一个再现像和它的共轭像. 只有一入射光束的再现像和另一入射光束的共轭像才能通过放置在透镜后焦面上的小孔. 因此形成了一个位相为原物体位相分布两倍的像. 设激光波长和波矢的模分别为

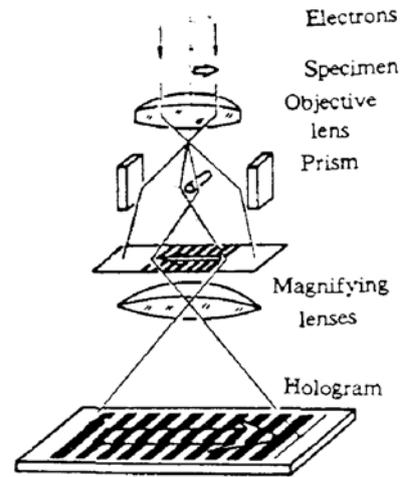


Fig. 1 Schematic diagram of electron-optical system for hologram formation

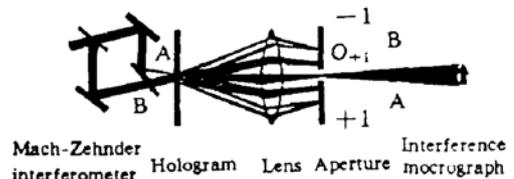


Fig. 2 Schematic diagram of optical reconstruction

λ_2 和 $k_2 = 2\pi/\lambda_2$, 入射角为 θ , 复振幅为 $\exp[ik_2x_h\sin\theta]$, 则由激光照射全息图的正一级衍射波可写为

$$A_1 \propto \exp\{i[(k_1/M)\varphi(x_h, y_h) + k_2x_h\sin\theta + (k_1/M)(\sin\theta_0 - \sin\theta_r) + (k_1/M)(\delta_0 - \delta_r) + k_2\delta_1]\} \quad (2)$$

同理, 负一级衍射波为

$$A_{-1} \propto \exp\{i[-(k_1/M)\varphi(x_h, y_h) + k_2x_h\sin\theta - (k_1/M)(\sin\theta_0 - \sin\theta_r) - (k_1/M)(\delta_0 - \delta_r) + k_2\delta_{-1}]\} \quad (3)$$

现在, 我们开始进一步讨论(2)式和(3)式.

1) 如果我们用滤波针孔选择, 让一级衍射波垂直于全息图的衍射, 那么正一级衍射波满足

$$k_2\sin\theta + (k_1/M)(\sin\theta_0 - \sin\theta_r) = 0 \\ \theta_{+1} = \sin^{-1}[-(\lambda_2/M\lambda_1)(\sin\theta_0 - \sin\theta_r)]$$

同理, 对负一级衍射波有

$$k_2\sin\theta - (k_1/M)(\sin\theta_0 - \sin\theta_r) = 0 \\ \theta_{-1} = \sin^{-1}[(\lambda_2/M\lambda_1)(\sin\theta_0 - \sin\theta_r)]$$

因此, 当这两束波通过针孔干涉后, 有

$$I_r \propto 1 + \cos\{(k_1/M)[2\varphi(x_h, y_h) + 2(\delta_0 - \delta_r)] + k_2(\delta_1 - \delta_{-1})\} \quad (4)$$

2) 当程差 $(k_1/M)2(\delta_0 - \delta_r) + k_2(\delta_1 - \delta_{-1}) = 0$, 有

$$I_r = 1 + \cos\{(k_1/M)[2\varphi(x_h, y_h)]\} \quad (5)$$

从方程(5)可以看到, 只有电子全息图记录的带电聚乙烯乳剂小球的静电场引起的光程差 $\varphi(x_h, y_h)$ 或者位相差 $(k_1/M)\varphi(x_h, y_h)$ 被放大了两倍.

我们不能断定上述两个假设在实验中是否成立, 例如, 无法精确判断两分束再现激光是否以角度 θ_{+1} 和 θ_{-1} 入射到全息图上. 同时, 也无法判断 $(k_1/M)2(\delta_0 - \delta_r) + k_2(\delta_1 - \delta_{-1})$ 是否等于零, 因为, 这意味着垂直于全息图衍射的正一级和负一级两衍射波之间的光程差等于零. 然而如何判断这个光程差等于零? 就我们所知, 目前还无法判定. 这对电子全息图的再现, 特别是对微弱的位相信息, 是一个待解决的问题.

假如光程差 $(k_1/M)2(\delta_0 - \delta_r) + k_2(\delta_1 - \delta_{-1}) \neq 0$, 可以得到

$$I_r \propto 1 + \cos\{(k_1/M)[2\varphi(x_h, y_h) + 2(\delta_0 - \delta_r)] + k_2(\delta_1 - \delta_{-1})\}$$

一般来说, 电子全息图的载波频率比较低, 因而有 $\delta_1 \approx \delta_{-1}$ 和 $\delta_0 \approx \delta_r$. 通过不同入射方式再现电子全息图, 获得了一系列带电聚乙烯乳剂小球的电位分布图, 如图 3 所示. 哪一张图是正确的? 无法判断. 从马赫-陈德尔干涉仪再现电子全息图放大位相差的结果来看, 这些图似乎是一些定性的实验结果. 在位相信息被放大的同时, 误差也应以同样的倍数被放大.

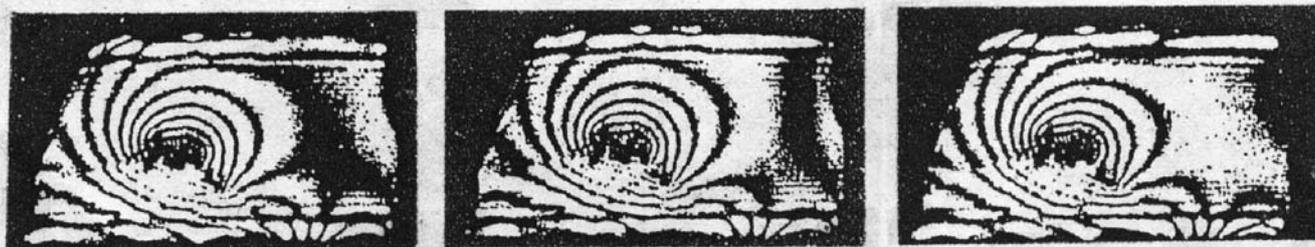


Fig. 3 Contour map of 2x phase amplification with various incident illumination

3.2 利用两张全息图再现

首先, 一张全息图记录有带电聚乙烯乳剂小球的电位分布信息. 然后, 另一张全息图在同样条件下拍摄, 只是不含变形场的信息. 接着, 电子全息图以两种方式再现.

3.2.1 同轴再现

图 4 是同轴再现实验装置的示意图. 通过精确重叠两张全息图便可获得一系列带电聚乙烯乳剂小球的静电场等位线, 如图 5 所示. 在这里遇到了利用马赫-陈德尔干涉仪再现电子全息图时的同样问题. 误差取决于入射波前法线和全息图法线之间的倾斜角及重叠的精确性.

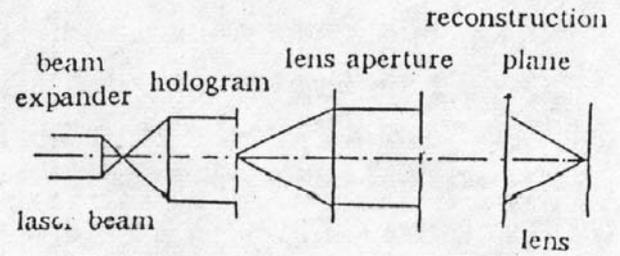


Fig. 4 Sketch of the in line reconstruction set-up

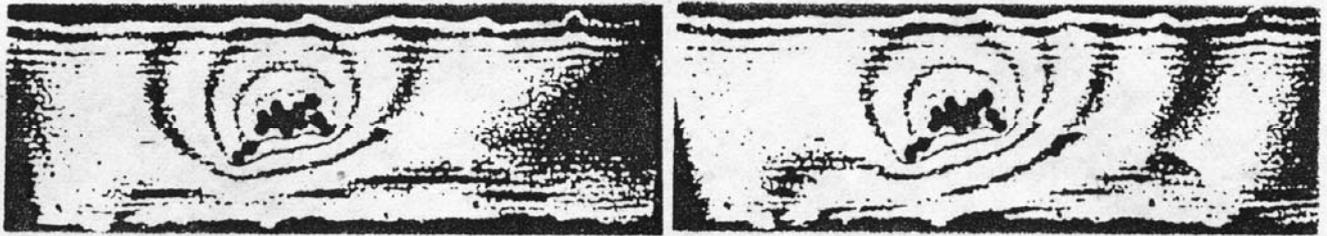


Fig. 5 Contour map from in line reconstruction when overlapped position of electron holograms were moved very little

3.2.2 离轴再现

与 3.1 中的方法相似, 两张全息图(一张记录有位相信息, 另一张没有)放置在马赫-陈德尔干涉仪的两臂中再现. 也有类似 3.1 的问题. 显然, 方程(4)中的 $(k_1/M)2(\delta_0 - \delta_r) + k_2(\delta_1 - \delta_{-1})$ 是迭加在位相信息上的. 如果 $(k_1/M)2(\delta_0 - \delta_r) + k_2(\delta_1 - \delta_{-1})$ 是常量, 并可以从实验结果中排除, 那么位相就可以精确测定. 例如, 用光学全息术中的双曝光法测量位相.

3.3 电子显微镜中的双曝光全息术^[10]

利用双曝光全息术可在电子显微镜中同一张胶片上拍摄两张全息图, 再现时, 两张全息图的再现波前发生干涉. 第一次曝光时在样品面上放置了聚乙烯乳剂小球, 第二次曝光时没放样品. 当经过冲洗处理的电子全息图用激光或者自然光照射时, 将再现出两个像. 干涉图样照片显示出带电聚乙烯乳剂小球静电场的电位分布. 图 6(a) 是一些直径为 $0.32 \mu\text{m}$ 的带电聚乙烯乳剂小球的原双曝光像面全息图的放大复制照片. 在这张照片上可清楚地看到两套重叠干涉条纹产生的条纹, 这些条纹是一系列围绕在小球周围的等位带.

如果把这些带的形状和图 6(b) 中线的形状做一比较, 可以确定带和线是一一对应的. 由此, 可以得出结论, 高质量的等位条纹可以简单地通过冲洗双曝光全息图的照片获得, 而不用求助于光学再现. 此外, 利用双曝光法获取等位条纹的优点是避免了人为引入的误差, 而这些误差在通常用光学平台上的马赫-陈德尔干涉仪再现一次曝光全息图时是不可避免的.



Fig. 6 (a) Print of double-exposure hologram of a set of charged sphere.

(b) Contour map obtained in the optical bench of the same region to (a)

4 讨 论

1) 双曝光电子全息图也有一定的局限性,它不容许两次曝光之间存在由于振动引起的位相差,因而它对电子显微镜的稳定性提出了严格要求.

2) 双曝光全息干涉术的灵敏度取决于干涉条纹最小可测量到的位移.这个位移总是条纹宽度的几分之一,因此不能进行足够精确的测量.在文献[10]中提出了利用高频载波条纹的双曝光全息图放大位相差的方法.这个方法保持了双曝光全息图的主要优点,并且把灵敏度提高了几个数量级.

参 考 文 献

- [1] Akira Tonomura, Tsuyoshi Matsuda, Junju Endo *et al.*, Development of a field emission electron microscopy. *Japan. J. Appl. Phys.*, 1979, **28**(1):1~11
- [2] G. F. Missiroli, G. Pozzi, U. Valder, Electron interferometry and interference electron microscopy. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1981, **14**(6):649~671
- [3] J. W. Chen, G. Matteucci, A. Migliori *et al.*, Mapping of microelectrostatic fields by means of electron holography; Theoretical and experimental results. *Phys. Rev. A.*, 1989, **40**(6):3136~3146
- [4] Karl-Joseph Hanszen, Methods of axis electron holography and investigation of the phase structure in crystals. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1986, **19**(13):373~395
- [5] Akira Tonomura, Application of electron holography. *Rev. Mod. Phys.*, 1987, **59**(3):639~669
- [6] A. Tonomura, Application of electron holography using a field-emission electron microscopy. *J. Electron Microsc.*, 1984, **33**(2):101~115
- [7] S. Frabboni, T. Matsuda, T. Kawasaki *et al.*, Observations of revers biased P-N junctions by electron holography. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**(20):2196~2199
- [8] G. Matteucci, G. F. Missiroli, J. W. Chen *et al.*, Mapping of microelectric and magnetic fields with double-exposure electron holography. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**(3):176~178
- [9] H. Lichte, Electron holography approaching atomic resolution. *Ultramicroscopy*, 1986, **20**:293~304
- [10] Fu Shufen, Chen Jianwenn, Phase difference amplification of double exposure holograms. *Opt. Commun.*, 1988, **67**(6):417~420

Some problems on reconstruction of electron holography

CHEN Jianwen ZHU Peiping XIAO Tiqiao WANG Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 5 January 1993)

Abstract

The reconstruction methods of phase information "Frozen" in an electron hologram are discussed. The experimental results show that the double-exposure can not only obtain directly the phase information, where it doesn't need laser reconstruction, but also gives quantitative results. This means that the information of both amplitude and phase can be simultaneously obtained in an experiment with electron microscope.

Key words electron holography, double-exposure, phase difference amplification.