

从像上提取非旋转对称系统的传递函数制作解卷空间滤波器

沈晓庆 郑师海 李方华
(上海机械学院光仪系) (中国科学院物理研究所)

提 要

本文提出从高分辨电子显微像中,利用光学、全息和部分相干等方法,提取传递函数,制作相位和振幅滤波器,实现解卷,提高高分辨电子显微像的分辨率。

关键词: 高分辨电子显微像, 相位衬度传递函数, 成像全息。

一、引 言

高分辨电子显微像是样品函数与电子光学系统点扩散函数的卷积。电子波经弱相位物体后引起相位移。电子透镜像差将引起附加的相位移。透镜产生的相位移对弱相位物体成像的影响,用相位衬度传递函数(PCTF)表示。衰减的相位衬度传递函数使实际分辨率远偏离理论极限分辨率。系统的非旋转对称像差使得传递函数沿方位角方向各向异性,而非旋转对称像差在电子显微镜中往往是很难校正的(如电子污染等)。以前的高分辨电子显微像分辨率改善工作都是局限于等晕系统^[1,2,3]。本文对带有非旋转对称像差系统即点扩散函数线性空间旋转变系统,提出了从像中提取传递函数的方法,利用光学、全息和部分相干等方法,制作空间相位和振幅滤波器,用于高分辨电子显微像解卷。

二、复数空间滤波器制作原理

光与电子的散射,衍射机制不同,但在波动的观点上是相似的。高分辨电子显微像将物质的原子结构放大几十万倍,而光波长又是电子束波长的几十万倍,因此可以借助于光学衍射和光学处理装置来研究和处理高分辨电子显微像。

1. 振幅滤波器

实验是利用部分相干原理,根据碳膜高分辨电子显微像的颗粒结构分布性质,在像谱中平均物谱,光滑传递函数,制作振幅滤波器。对于弱相位物体的像强度,可表示为

$$i(x, y) = 1 + 2\sigma\phi(x, y) \otimes \mathcal{F}\{\sin \chi(u, v)\}, \quad (1)$$

式中 ϕ 为物体电势分布函数, χ 是物镜球差和失焦给电子波附加的相位因子, σ 为常数, \otimes 为卷积。像强度傅里叶变换为

$$I(u, v) = \delta(u, v) + 2\sigma\Phi(u, v) \sin \chi(u, v), \quad (2)$$

$\sin \chi(u, v)$ 就是相位衬度传递函数。非晶碳膜样品信息可以看成是由很多大小不一的无规粒子组成, 可表示为

$$\phi(x, y) = \sum_{i=0}^n f(d_i, b_i) \delta(x - d_i, y - b_i), \quad (3)$$

$f(d_i, b_i)$ 表示颗粒空间分布大小的加权因子。物函数的傅里叶变换为

$$\Phi(u, v) = \sum_{i=0}^n f(d_i, b_i) \exp[-i2\pi(d_i u + b_i v)], \quad (4)$$

将(4)式代入(2)式可知谱强度也是无规粒子受传递函数 $\sin \chi(u, v)$ 调制。由于 $\sin \chi(u, v)$ 沿空间方位角方向各向异性, 提取传递函数用传统的方法^[3]很困难。采用如图 1 所示的系统, 输入面放置碳膜高分辨电子显微像。在光瞳上加一慢相位变化的掩膜, 引入变化相位因子 $\exp[-ik\pi(x+y)]$, k 为不同慢相位变化的变化率, 输出面得到

$$T'(u, v) = [\delta(u, v) + 2\sigma\Phi(u, v)\sin \chi(u, v)] \otimes D(u, v), \quad (5)$$

$$D(u, v) = \int_{-a}^a \exp[-i\pi k(x+y)] \exp[-i2\pi(ux+vy)] dx dy \\ = \delta\left(\frac{u}{k} - \frac{1}{2}, \frac{v}{k} - \frac{1}{2}\right); \quad (6)$$

所以 $D(u, v)$ 在一段时间间隔内与 $\Phi(u, v)\sin \chi(u, v)$ 的卷积结果, 相当于原有物体颗粒衍射后相互作用的光场中加进了一个随机的慢相位变化因子, 等于取统计平均, 在一定时间间隔内记录得到

$$T(u, v) = \delta(u, v) + 4\sigma^2 |\sin \chi(u, v)|^2, \quad (7)$$

上式为相位衬度传递函数强度分布, 根据这一原理, 可以制成振幅滤波器。

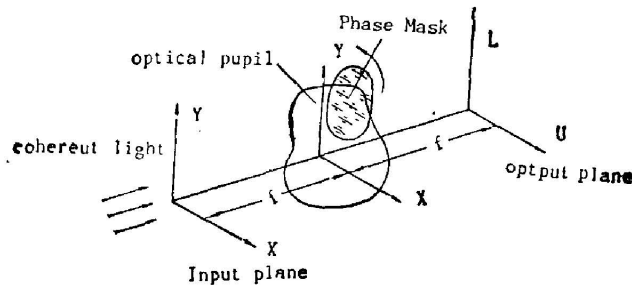


Fig. 1 The partial coherent optical device used for averaging object spectrum and abstracting the transfer function

2. 相位滤波器

(a) 空频域传递函数的相位确定

确定空频域传递函数的相位分开, 首先要确定传递函数零点。零点是由交变相位产生, 零点两边区域相位差为 π 。我们利用胶片的非线性特性, 从实际电子显微像的 Thon 衍射像确定相位零点。将已线性记录的 Thon 衍射像(图 4(a))置于一简单非相干成像系统物面。在成像面上放置高反差胶片, 透过胶片的光强分布如图 2(a)所示。

假定入射光强为 E_0 , 在高反差胶片上的曝光量

$$E = E_0 10^{-D_i(x)}. \quad (8)$$

式中 $D_i(x)$ 为输入图像的密度分布。高反差胶片的响应表示如图 2(b)所示, 限幅密度 D 。给

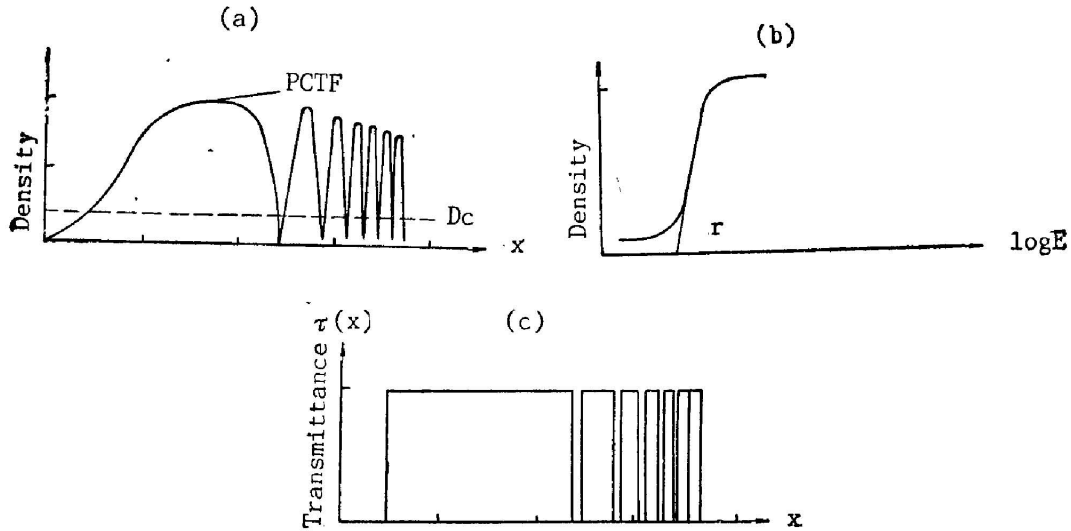


Fig. 2

(a) Density of the input image; (b) Response of the high-contrast film;
(c) Transmittance of processed film

出了图 2(a) 中复制胶片曝光的最大密度值, 限幅高低正比于使用光强, 当我们使用的胶片 (γ 值大) 阈值曝光量为 E_0 , 只要满足 $E_0 > E_c$, 即满足 $D_i(x) < \log(E_0/E_c)$ 底片曝光变黑, 胶片透过率

$$\tau(x) = \frac{1}{2} \{1 + \text{sgn}[D_i(x) - D_c]\}, \quad (9)$$

复制胶片在理想情况下, 或者为 1 或者为零。图 2(c) 是处理后沿某一方位角方向的单位振幅透过率。不透明部分为精确确定的零点位置。根据传递函数的零点, 分别制作按衍射图椭圆奇数环和偶数环的带通滤波器。

(b) 用成像全息法制作相位滤波器

利用图 3 所示成像全息装置, 将椭圆环的带通滤波器置于输入 P_1 面, 采用二次曝光全息法。第一次曝光输入面 P_1 上放置椭圆奇数环带通滤波器。光通过带通滤波器至 P_2 面成像, 引入参考光记录全息图。然后在输入面换置椭圆偶数环带通滤波器, 并在参考光中加入一 $(\lambda/2)$ 波片, 使第二次曝光时参考光的相位滞后 π , 两次曝光后经洗影处理得到一张椭圆偶数与奇数环带间相位差下的全息图, 这样就制得所需相位滤波器。相位滤波器的空间频率可由参考光与光轴的夹角确定。

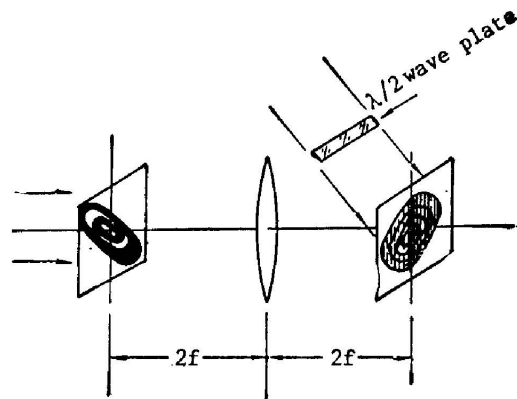


Fig. 3 The image holographic device

四、实验结果和讨论

用部分相干原理制作振幅滤波器, 实验上用相干光照明非晶碳膜高分辨电子显微象, 在如图 1 所示变换透镜的出瞳平面加随机慢相位变化的相位旋转掩膜(Mask), 在输出平面得

到平均物谱后, 且具有连续光滑的传递函数强度分布, 适当控制胶片 γ 值, 就可以制成 $|H(x, y)|^{-1}$ 的振幅滤波器。图 4(a)和图 4(b)分别给出了处理前后的结果。图中曲线是沿纵坐标 128 处(中心)水平密度切片。可以看到, 4(a)是由离散物谱颗粒分布组成, 密度分布曲线振荡并受衰减包络函数调制。而图 4(b)是由一非常光滑的密度曲线组成, 颗粒分布被平均。比较图 4(a)和(b), 处理后光滑的传递函数分布, 其分辨率基本没有影响, 这是因为光瞳面加入的仅是变化的相位因子, 光瞳形状没有改变。

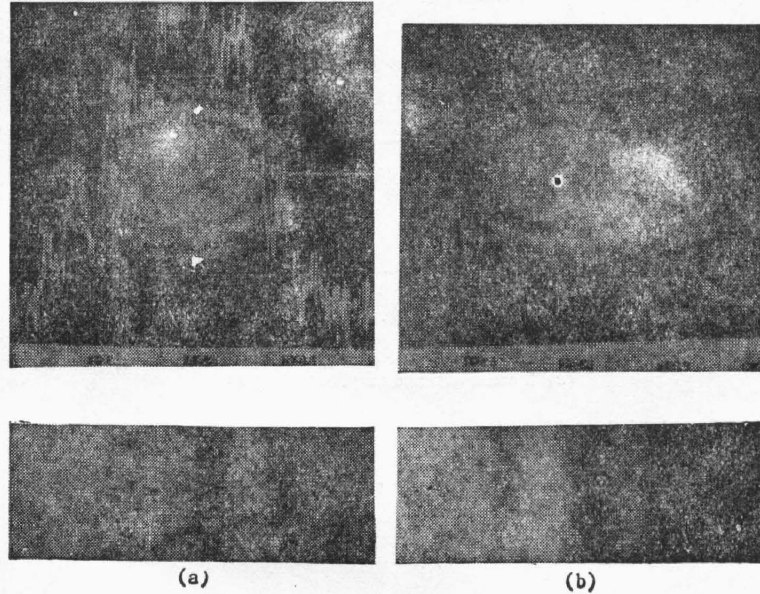


Fig. 4

(a) The Thon-diffraction of an electron micrograph of carbon foil; (b) The distribution of smooth transfer function after averaging the object spectrum.

用成像全息装置, 二次曝光法制作相位滤波器过程简单, 在二次曝光过程中只需在参考光中加一 $(\lambda/2)$ 波片。很适用于系统点扩散函数较为复杂的情况。在两次曝光间输出面上参考光对不透光部分仍有光强贡献, 因此实验中使用较弱参考光, 避免干涉条纹对比度过于下降, 环带滤波器的黑白边界在相干光成像时有一定边界衍射作用, 使边界不清晰。由于传递函数零点附近频率段信噪比很低而无信息传递, 因此相位滤波器边界模糊的问题可以忽略。图 5 给出了相位滤波器示意图。

图像处理工作可在相干光学处理装置 ($4f$ 系统) 中进行。高分辨电子显微像照片的复制片经傅里叶变换后与频谱面上准确叠置的两个照相透明片相乘, 一个是振幅滤波器, 通过吸收对入射到滤波器上的光场振幅起作用; 另一个是全息图, 通过其衍射光栅性质对光场的相位起作用。滤波后正一级衍射处得到传递函数负相位翻转和振幅恢复的物谱光场分布。图 6(a)是计算给出的原始 PCTF 曲线, 相位恢复后的传递函数如图 6(b)所示, 相位和振幅恢复后的传递函数如图 6(c)所示。除了传递函数零点外, 传递函数有一个较平坦的区域。再经透镜作傅里叶变换, 输出面得到一个解卷的原物体像。文献 [5] 讨论了复合滤波器对不同离焦恢复传递函数后电子显微像的分辨率恢复情况。文献 [6] 进一步解决了传递函数零点填补技术, 在此不再赘述。本文提出的方法, 可以对具有任意脉冲响应的电子光学系统的

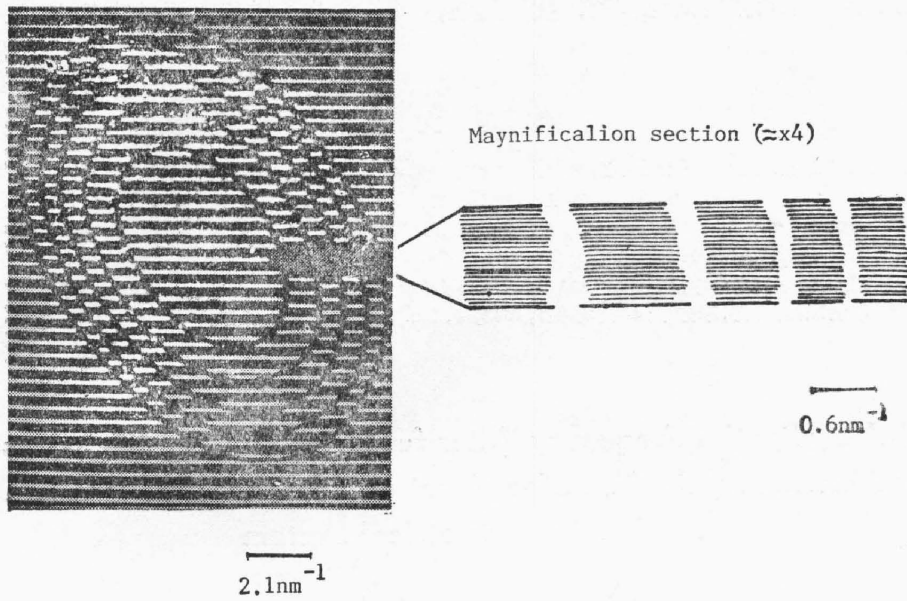


Fig. 5 The principle phase filter

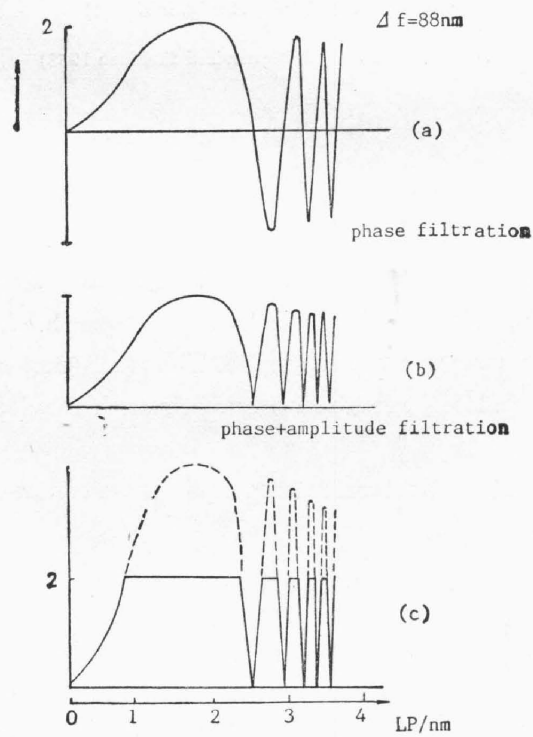


Fig. 6 Effect of the phase and amplitude component of a spatial frequency filter for transfer function in reconstruction of a single film

高分辨电子显微像制作空间滤波器, 实现解卷, 恢复大分子样品和原子结构的电子显微像。

参 考 文 献

- [1] G. W. Stroke, M. Halioua; *Phys. Lett. (A)*, 1970, **33A** (Sep), 3~4.
- [2] M. H. Hahn; *Optik*, 1972, **35**, No. 3 (Mar), 326~337.
- [3] G. W. Stroke *et al.*; *Proc IEEE*, 1977, **65**, No. 1 (Jan), 39~61.
- [4] 沈晓庆, S. Boseck; *Optik*, 1984, **68**, No. 2 (Feb), 137~146.
- [5] 沈晓庆, 郑师海, 李方华; 《中国激光》, 1988, **15**, No. 3 (Mar), 156~162.
- [6] 沈晓庆, 李明杰, 郑师海, 李方华; 《光学学报》, 1988, **8**, No. 2 (Feb), 171~176.

Making Spatial Frequency Filter for Deconvolution by Means of Abstracting the Transfer Function from the Image in an rotational asymmetrical System

X. Q. SHEN

(Shanghai Institute of Mechanical Engineering)

S. H. ZHENG, F. H. LI

(Institute of Physics, Academia Sinica)

(Received 15 July 1987; revised 21 March 1988)

Abstract

The transfer function of an electron-optical system with rotational asymmetrical aberrations is anisotropic in spatial frequency domain. By means of optical, holographic and partial coherent method a new technique is suggested in this paper to abstract the transfer function from the electron micrograph. The phase and amplitude components of spatial frequency filter are made. The resolution of electron micrograph with asymmetrical aberrations can be improved through the deconvolution.

Key words: high resolution electron micrograph, phase contrast transfer function, Image holograph.