

光学傅氏变换离焦近似及解卷积的应用

陈 岩 松 郑 师 海 马 学 斌¹⁾

中国科学院物理研究所

1989 年 2 月 11 日收到

本文研究了光学傅氏变换的离焦近似问题,导出了使傅氏变换关系近似成立在光学上所需要满足的离焦条件,并以此为基础,提出用离焦谱平面方法对电子显微照相图象进行解卷积处理,使得光学解卷过程大大简化。实验得到了满意的结果。

一、引 言

光学信息处理(相关、解卷积、各种滤波处理等)的主要基础是基于凸透镜性能上的光学傅里叶变换^[1]。而且,所有的处理又都是在傅氏变换谱面上对输入目标的频谱进行各种滤波处理的。因此,在操作中准确掌握傅氏谱面的位置是十分重要的。但是,一切实际的光学傅氏变换是很难做到严格不离焦的。在另一方面,在某些情况下人们恰恰需要这种具有一定离焦量但仍满足傅氏变换关系的谱面,以改善线性动态范围或谱的分布形态,达到更好记录或处理的目的。例如,对某些电子显微镜图象的处理就是如此。这就产生一个需要研究的问题,即傅氏变换关系在一定离焦量情况下是怎样的?何种条件下可近似成立?如成立能否用于解卷积等处理?本文针对这些问题进行了研究,结论是正定的。

二、光学傅氏变换的离焦近似

由凸透镜 L (焦距为 f) 组成的光学傅氏变换系统示于图 1 中,图中 (x, y) , (ξ, η) 与 (u, v) 分别为前焦平面、透镜平面和后焦平面的坐标。

在图 1 所示的系统中,光波从 (x, y) 平面出射,经过自由空间传播到达透镜,透过透镜再次经过自由空间传播,最终到达 (u, v) 平面。设 $f(x, y)$ 和 $F(u, v)$ 分别为输入和输出这两个平面上的光场分布函数,则二者之关系由上述光波的传播过程表示,

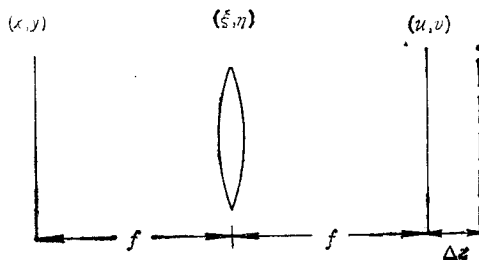


图 1 光学傅氏变换离焦示意图

1) 现在机械电子工业部七七〇厂工作。

$$F(u, v) = G(u, v; \xi, \eta) \phi(\xi, \eta) G(\xi, \eta; x, y) f(x, y). \quad (1)$$

式中 G 为光波在自由空间的传播因子, ϕ 为透镜作用因子. 在光学傍轴近似条件下, G 采用菲涅耳衍射表示, ϕ 为二次相位形式^[2].

$$G(\xi, \eta; x, y) = c_1 \exp \left\{ \frac{j\pi}{\lambda f} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2] \right\}, \quad (2)$$

$$\phi(\xi, \eta) = c_2 \exp \left[\frac{-j\pi}{\lambda f} (\xi^2 + \eta^2) \right]. \quad (3)$$

设 (u, v) 平面的位置由于某种原因而离焦, 离焦量为 Δz , 于是

$$G(u, v; \xi, \eta) = c_3 \exp \left\{ \frac{j\pi}{\lambda(f + \Delta z)} [(\xi - u)^2 + (\eta - v)^2] \right\}. \quad (4)$$

(2)至(4)式中的 c_1 , c_2 和 c_3 为与问题无关的常数, λ 为光波波长. 把(2), (3)和(4)式代入(1)式, 并完成对 ξ 和 η 的积分, 得到

$$F(u, v) = c \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp \left[\frac{-j2\pi}{\lambda f} (xu + yv) \right] \cdot \exp \left[\frac{j\pi \Delta z}{\lambda f^2} (x^2 + y^2) \right] dx dy. \quad (5)$$

(5)式中的常数 c 总括了 c_1 , c_2 和 c_3 等计算中的所有常数. (5)式比正常的傅氏变换多一个二次相位项. 此项可以省略的条件是令它的二次相位部分远小于 1 弧度, 即

$$\frac{\pi \Delta z (x^2 + y^2)}{\lambda f^2} \ll 1. \quad (6)$$

在此条件下, (5)式变成近似的傅氏变换式

$$F(u, v) \approx \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp \left[\frac{-j2\pi}{\lambda f} (xu + yv) \right] dx dy. \quad (7)$$

因此, 只要离焦量满足所要求的条件(6)式, 输入平面与此离焦平面之间的傅氏变换关系仍然成立. 而且这谱面的允许离焦量是随函数输入孔径的减小而增大, 两者成反比关系. 一组典型的数据是, 取 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $f = 1000 \text{ mm}$, 当输入孔径为 5 mm 时, 允许的离焦量为 32 mm . 显然, 这样的允许离焦量在光学实验中是受人欢迎的.

三、电子显微照相图象解卷积处理

为了观察和记录的需要, 透射式电子显微镜的图象一般都有一定程度的离焦模糊. 同时, 有时因电磁透镜的非球对称而使离焦点扩散函数具有椭圆状分布形态. 在光学解卷积处理中, 对于圆对称形态的点扩散函数一类问题是方便的. 用光学解卷方法处理电子显微照相图象, 提高图象的分辨率, 以往学者的研究^[3-5]是卓有成效的. 但是, 对于椭圆状非旋转对称的点扩散函数, 仍然是一个需要更好解决的问题. 本文根据上节的傅氏变换离焦近似原理, 提出偏转傅氏频谱平面的方法, 使椭圆点扩散函数转化为易于光学处理的圆形点扩散函数问题.

设 $g(x, y)$ 为电子显微照相的目标函数, 对于由碳颗粒组成的碳膜, 它可以表示为

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^N w(x_i, y_i) \delta(x - x_i, y - y_i), \quad (8)$$

式中 w 为权因子. 此目标的电子显微照相图象 e 由下列卷积积分给出:

$$e(x', y') = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) h(x' - x, y' - y) dx dy, \quad (9)$$

式中 $h(x' - x, y' - y)$ 为电子显微照相成像系统的点扩散函数. 对 (9) 式等号两边同时作傅氏变换, 在频域内得到

$$E(u, v) = G(u, v) H(u, v). \quad (10)$$

在频域内, 设置滤波器 $1/H(u, v)$ 对 (10) 式进行滤波, 则可完全消除点扩散造成的象模糊. 在光学滤波方法中采用的是复合滤波片, 它由振幅和相位二片滤波片叠合组成.

图 2 是碳膜电子显微照相图象的光学傅氏变换频谱图(见图版 I). 它表明, 点扩散函数具有椭圆状的频谱分布, 目标函数的频谱呈现出散斑状分布, 它是由许多准平面波相干叠加形成, 这可通过对 (8) 式的傅氏变换加以理解. 点扩散函数频谱同目标函数频谱相乘形成如图 2 所示的椭圆环状散斑图.

让频谱面以椭圆长轴为轴朝光轴方向偏转, 使谱分布成为圆对称分布. 偏转的角度通过测量椭圆长短轴之比求得, 实际测得之比为 1:0.57, 对应的偏转角为 55° . 这样一来, 在这个偏转的谱面内, 点扩散函数的频谱是圆对称分布的, 谱的外缘处的最大离焦量为 20mm 左右, 小于允许的离焦量, 是满足傅氏变换离焦近似条件的. 至此, 问题被转化为圆对称点扩散函数的光学解卷问题. 对于这类问题, 在光学处理中人们是熟知的, 为了节省篇幅, 对处理过程将不作赘述.

图 3 (见图版 I) 展示了电子显微照相碳膜图象光学处理前后的结果. 处理前的原始图象见图 3 (a): 大量无规分布的碳颗粒由于失焦及其相位反转缘故, 彼此交叉重叠, 已与原碳膜目标面目全非; 处理后的图象见图 3 (b): 经过光学解卷处理, 离焦的碳膜图象质量得到改善, 其分辨率明显提高.

图 4 (见图版 I) 是把光学解卷处理前后的电子显微照相碳膜图象重叠在一起的情景, 它显示出环状的莫尔条纹. 这说明, 处理前后的图象确是属于同一个碳膜目标, 虽然从表面上看处理前后的图象显得很不相同. 如果在处理中, 使用了不适当的滤波器, 它使原目标图象的频谱丢失与畸变, 导致处理后图象的严重失真, 那么, 处理前后两者的叠合将得不到莫尔条纹. 因此, 图 4 所示的莫尔条纹同时也说明本光学处理是成功的, 并使用了正确的滤波器.

四、结 论

对于光学傅氏变换中谱面的离焦问题进行了研讨, 得出了傅氏变换离焦近似所要求满足的离焦判据条件式. 根据此条件式可以确定最大的允许离焦量, 这对实际的光学傅氏变换是有意义的. 利用光学傅氏变换的离焦近似, 提出偏转频谱面的方法, 让椭圆状点扩散函数的频谱转化成圆对称分布, 从而使问题归结为光学中易于处理的问题. 用这种

方法,处理了具有椭圆点扩散模糊的电子显微照相碳膜图象,实验结果表明,经过光学解卷处理的图象,其分辨率明显提高。

- [1] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw-Hill, New York, (1968).
- [2] M. Born, E. Wolf, 光学原理(中译本),上册,杨葭荪等译,科学出版社,(1978),494—505 页.
- [3] G. W. Stroke and R. G. Zech, *Phys. Lett.*, **25A** (1967), 89.
- [4] G. W. Stroke *et al.*, *Proc. IEEE* **65**(1977), 39.
- [5] X. Q. Shen *et al.*, *Optik*, **79**(1988), 171.

RESEARCH ON DEFOCUS APPROXIMATION OF OPTICAL FOURIER TRANSFORM AND DECONVOLUTION

CHEN YAN-SONG ZHENG SHI-HAI MA XUE-BING

Institute of Physics, Academia Sinica

(Received 11 February 1989)

ABSTRACT

In this paper, the approximation of optical Fourier transform in the cases of defocus is studied, and the relation of condition required for the defocus approximation of Fourier transform is derived. From this principle a method of using the defocus approximation is described for deblurring an electronic micrographic image, which makes the optical deconvolution process significantly simplified. The experimental results show that the quality of the image of an amorphous carbonic film is notably improved.

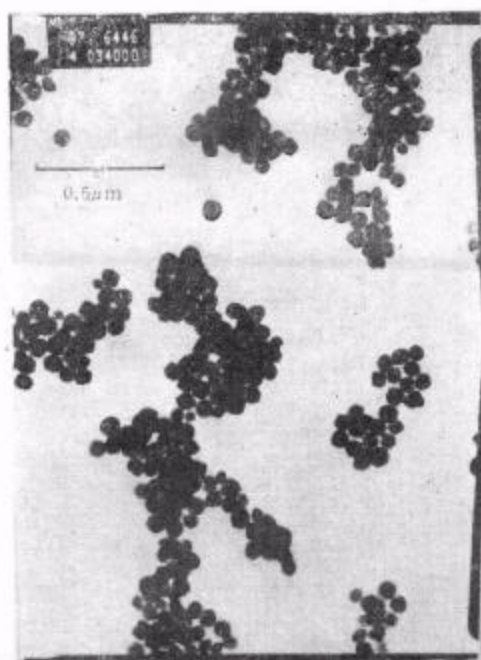


图1 平均直径为 65 nm 的球形 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 超微粒的透射电子显微镜照片
可看出微粒为理想的球形 $\times 34000$

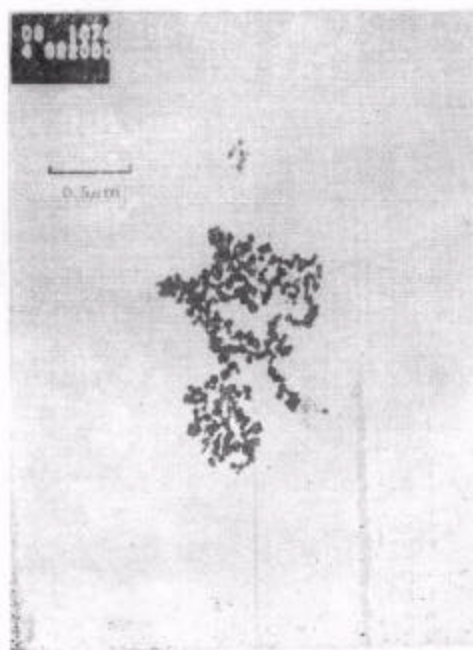


图2 平均粒度为 90 nm 的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 超微粒的透射电子显微镜照片 $\times 22000$

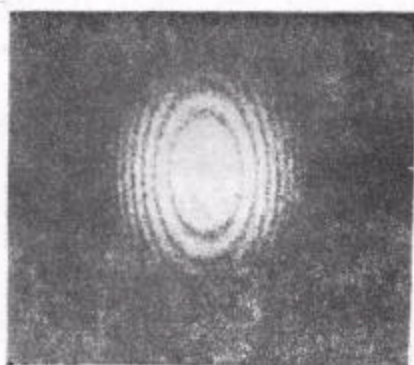
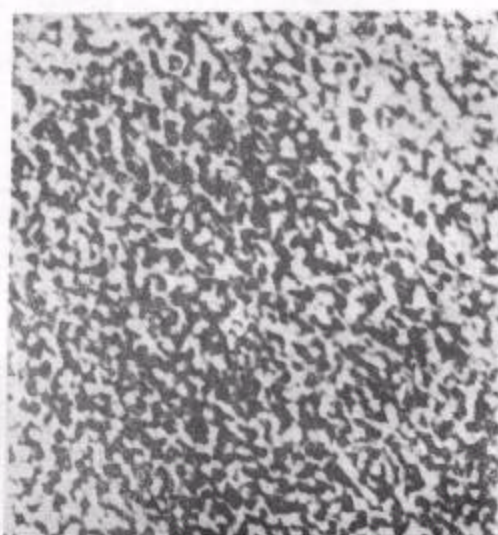


图2 碳膜电子显微照相图象的光学傅氏频谱



(a) 解卷处理前



(b) 解卷处理后

图3 透射式电子显微镜的碳膜图象

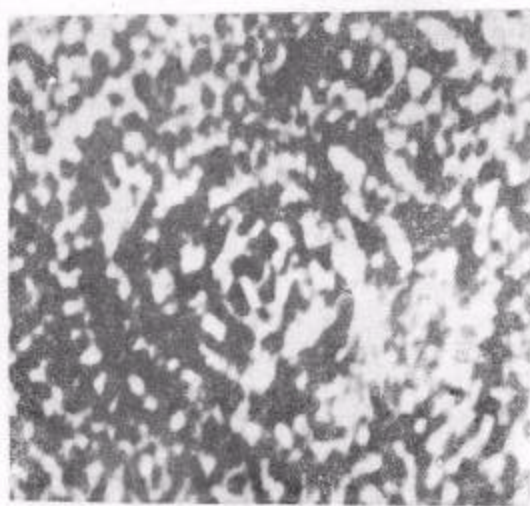


图4 光学解卷处理前后电子显微照相碳膜图象的叠合情景,显示出莫尔条纹



图 5 样品磁畴照片 $\times 100$



图 6 膜面的划痕 $\times 250$

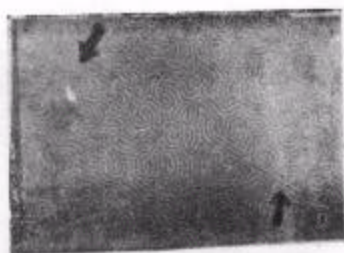


图 7 基底划痕外延到薄膜中
箭头所指为划痕 $\times 250$



图 8 X 射线双晶反射形貌图 $\times 5$
 FeK_{α_1} 衍射; 曝光 20h



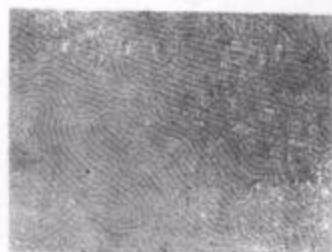
图9 薄膜断裂样品的磁畴照片 $\times 100$



图10 薄膜的双晶反射形貌图 $\times 3.5$
 $\text{FeK}\alpha_1$; 曝光 20h



图11 薄膜的双晶反射形貌图 $\times 3$
 $\text{FeK}\alpha_1$; 曝光 20h



(a) 腐蚀前



(b) 腐蚀掉表面一层后

图14 薄膜分层对磁畴的影响 $\times 100$