

图 10

用原子凝聚方法制备的无定形金属在退火过程中的结构转变也有相同的顺序。例如气相沉积方法制备的高度亚稳的 $\text{Cu}_{50}\text{Ag}_{50}$ 无定形合金,其结构转变过程如图 10 所示。它的最终平衡相是两个面心立方固溶体 ($\alpha + \beta$),随着退火温度升高,它的结晶过程应是上述两种转变方式之一^[9]。

非晶态金属的结晶过程是相当复杂的。在退火过程中,非晶态结构转变到它的平衡相之前,中间要经过一系列的逐步趋向更稳定的过渡相。在相同的试样中,常常会同时出现不同

的结晶形态。

参 考 文 献

[1] H. S. Chen, *Rep. Prog. Phys.*, **43**(1980), 353—432.
 [2] D. Turnbull, *Contemp. Phys.*, **10**(1969), 473—488.
 [3] R. Hultgren et al., *Selected Values of the Thermodynamic Properties of the Elements*, Metals Park, Ohio, American Society for Metals, (1973).
 [4] D. R. Uhlmann, *J. Non-Cryst. Solids*, **7**(1971), 337—348.
 [5] H. A. Davies, *Rapidly Quenched Metals III*, Vol. 1, Edited by B. Cantor, University of Sussex, Brighton, (1978), 1—21.
 [6] H. S. Chen, E. Coleman, *Appl. Phys. Lett.*, **28** (1976), 245.
 [7] S. Tanigawa, K. Shima, T. Masumoto, *Proceedings of the Fourth International Conference on Rapidly Quenched Metals*, Edited by T. Masumoto, K. Suzuki, Sendai, Japan, Vol. I, (1982), 501—504.
 [8] K. Shima, S. Tanigawa, Y. Wasoda, in ref. [7], 543—546.
 [9] H. Jones, *Rep. Prog. Phys.*, **36**(1973), 1425—1497.

傅里叶变换光学基本原理讲座

第六讲 空间滤波和光信息处理

钟 锡 华 (北京大学物理系)

一、相干光学图象处理系统 (4F 系统)

正如第五讲所述,用夫琅和费衍射来实现图象的频谱分解,最重要的意义是为空间滤波创造了条件。由于衍射场就是屏函数的傅里叶频谱面,空间频率 (f_x, f_y) 与衍射场点位置 (ξ, η) 一一对应,使得人们可以从改变频谱入手来改造图象,进行信息处理。为此设计了图 6.1 所示的图象处理系统。

在此系统中,两个透镜 L_1, L_2 成共焦组合, L_1 的前焦点 (x, y) 为物平面 O, 图象由此输

入。 L_2 的后焦点 (x', y') 为象平面 I, 图象在此输出。共焦平面 (ξ, η) 称为变换平面 T, 在此可以安插各种性能的空间滤波器。

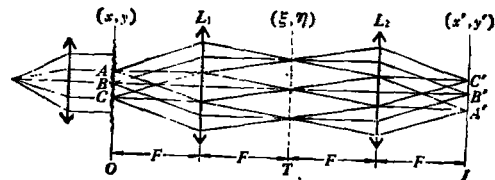


图 6.1 4F 图象处理系统

当平行光照射物平面时,整个 OTI 系统是个相干成像系统。由于变换平面上空间滤波器

的作用,输出图象得以改造,所以 OTI 系统又是一个相干光学信息处理系统. 这里先研究它的成象问题. 着眼于光的波动行为,服务于光学信息处理这个目的,我们将相干光学系统的成象过程分为两步: 第一步,从 O 面到 T 面,是第一次夫琅和费衍射,它起分频作用. 第二步,从 T 面到 I 面,又一次夫琅和费衍射,它起合成作用,即综合频谱输出图象. 在这样的两步中,变换平面 T 处于关键地位,若在此处设置光学滤波器,就能起到选频作用. 要想作到图象的严格复原, T 面必须完全畅通无阻. 此处的 $4F$ 系统,每次衍射都是从焦面到焦面,这就保证了复振幅的变换是纯粹的傅里叶变换,从而使计算比用原始的衍射积分简单得多. 下面证明,如果光波能够自由通过变换平面 T, 图象将完全还原.

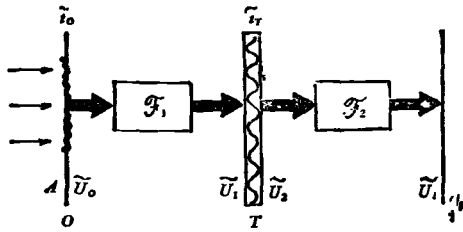


图 6.2 相干成象滤波系统工作原理方框图

如图 6.2 所示. 在物平面 O 上, $\tilde{U}_0(x, y) \propto \tilde{i}_0(x, y)$; 设在变换面 T 上 $\tilde{i}_T(\xi, \eta) = 1$, 从而 $\tilde{U}_T(\xi, \eta) = \tilde{U}_I(\xi, \eta)$, 记作 $\tilde{U}_T(\xi, \eta)$; 在象平面 I 上复振幅分布为 $\tilde{U}_I(x', y')$. 在两次夫琅和费衍射过程中, 复振幅的变换都是傅里叶变换:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_T(\xi, \eta) &= \mathcal{F}_1\{\tilde{U}_0(x, y)\}, \\ \tilde{U}_I(x', y') &= \mathcal{F}_2\{\tilde{U}_T(\xi, \eta)\}. \end{aligned}$$

略去一切数值系数不写, 上两式的具体表达式为

$$\begin{aligned} \tilde{U}_T(\xi, \eta) &\propto \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{i}_0(x, y) \\ &\quad \times \exp\left[\frac{-ik}{F}(x\xi + y\eta)\right] dx dy, \\ \tilde{U}_I(x', y') &\propto \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}_T(\xi, \eta) \end{aligned}$$

$$\times \exp\left[\frac{-ik}{F}(\xi x' + \eta y')\right] d\xi d\eta.$$

将前式代入后式, 得

$$\begin{aligned} \tilde{U}_I(x', y') &\propto \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{i}_0(x, y) \\ &\quad \times \exp\left\{\frac{-ik}{F}[\xi(x+x') + \eta(y+y')]\right\} \\ &\quad \times d\xi d\eta dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{i}_0(x, y) \\ &\quad \times \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{-ik(x+x')}{F}\xi\right] d\xi \right\} \\ &\quad \times \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{-ik(y+y')}{F}\eta\right] d\eta \right\} dx dy \\ &\propto \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{i}_0(x, y) \delta(x+x') \delta \\ &\quad \times (y+y') dx dy \\ &= \tilde{i}_0(-x', -y') \propto \tilde{U}_0(-x', -y'), \quad (6.1) \end{aligned}$$

亦即输出图象与输入图象完全一样, 上式中 x', y' 前的负号只表示象是倒立的.

上面的计算表明, 连续两次的傅里叶变换, 函数的形式复原, 只是自变量反号, 即图象倒置. 我们也可以说, 上述第二次傅里叶变换 $\tilde{U}_I = \mathcal{F}_2\{\tilde{U}_T\}$ 是一次傅里叶逆变换加图象倒置. 其实这个结论无需上述运算, 只把傅里叶变换和逆变换放在一起对比一下即可得到:

$$\begin{aligned} \tilde{U}_0(x, y) &= \mathcal{F}_1^{-1}\{\tilde{U}_T(\xi, \eta)\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}_T(\xi, \eta) \\ &\quad \times \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \\ &\propto \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}_T(\xi, \eta) \\ &\quad \times \exp\left[\frac{i2\pi}{\lambda F}(\xi x + \eta y)\right] d\xi d\eta. \quad (6.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{U}_I(x', y') &= \mathcal{F}_2\{\tilde{U}_T(\xi, \eta)\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}_T(\xi, \eta) \\ &\quad \times \exp[-i2\pi(f'_x \xi + f'_y \eta)] d\xi d\eta \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}_T(\xi, \eta) \\ &\quad \times \exp\left[\frac{-i2\pi}{\lambda F}(x'\xi + y'\eta)\right] d\xi d\eta. \quad (6.3) \end{aligned}$$

式中 $(f_x, f_y) = \frac{1}{\lambda F}(x, y)$, $(f'_x, f'_y) = \frac{1}{\lambda F}(x', y')$. 可以看出, 将(6.2)式右端的积分部分作如下变量代换:

$$(x, y) \rightarrow (-x', -y'),$$

它就与(6.3)式右端的积分一样, 因此得知

$$\tilde{U}_1(x', y') \propto \tilde{U}_0(-x, -y),$$

这便是上面的(6.1)式.

在上述未经滤波的特例里, 在频谱面上,

$$\tilde{U}_2 = \tilde{U}_1 \equiv \tilde{U}_T,$$

在有滤波器的情况下

$$\tilde{U}_2 = \tilde{U}_1 \cdot \tilde{i}_T \approx \tilde{U}_1,$$

这里 $\tilde{i}_T(\xi, \eta)$ 为滤波器的透过率函数, 这时经第二次傅里叶变换后, 函数形式不再复原, 但我们仍可对 \tilde{U}_2 作傅里叶逆变换, 然后将图象倒置, 以此来代替第二次傅里叶变换的运算. 从物理概念上可以这样理解: 对 \tilde{U}_2 作傅里叶逆变换, 是寻求这样一个假想的物波前, 它可不经滤波, 在频谱面上直接给出 \tilde{U}_2 , 此物波前的倒置就应是象面上的波前. 在今后的运算中, 我们将根据情况, 傅里叶正、逆两种变换的方法交替使用.

滤波器的透过率函数 \tilde{i}_T 可以叫做滤波(选频)函数. 从波前变换的眼光看, 空间滤波器不过是一块特殊的衍射屏, 它改变了第一次夫琅和费衍射场(波前), 从而产生一个新的波前, 使第二次夫琅和费衍射场(象面)不再是物光波前. 从频谱分析的眼光看, 空间滤波器改变了物频谱, 再综合的成象也就不再是原物了, 即实行了信息处理. 今后我们也将交替运用这两种观点, 分析空间滤波器对信息处理带来的后果.

[例1] 如果在如图 6.1 所示的 $4F$ 系统变换平面 T 上放一块正弦光栅, 会产生什么后果?

[解] 现在正弦光栅的透过率函数为 $\tilde{i}_T(\xi, \eta) = t_0 + t_1 \cos 2\pi f_0 \xi$, 复振幅的逐次变换如下:

$$\tilde{U}_1(\xi, \eta) = \mathcal{F}_1\{\tilde{U}_0(x, y)\},$$

其中

$$\tilde{U}_0(x, y) = \tilde{i}_0(x, y),$$

$$\tilde{U}_2(\xi, \eta) = \tilde{U}_1(\xi, \eta)\tilde{i}_T(\xi, \eta),$$

物理

$$\begin{aligned} \tilde{U}_1(x', y') &= \mathcal{F}_2\{\tilde{U}_2(\xi, \eta)\} \\ &= \mathcal{F}_2\{\tilde{U}_1(\xi, \eta)\tilde{i}_T(\xi, \eta)\} \\ &= \mathcal{F}_2\{\tilde{U}_1(\xi, \eta)\} \\ &\quad * \mathcal{F}_2\{\tilde{i}_T(\xi, \eta)\}. \end{aligned}$$

上面最后一步运算利用了傅里叶变换的一条性质: 原函数乘积的频谱是频谱的卷积. 第一个因子 $\mathcal{F}_2\{\tilde{U}_1(\xi, \eta)\}$ 与自由通过频谱面时一样, 故直接引入上面的结果:

$$\mathcal{F}_2\{\tilde{U}_1(\xi, \eta)\} \propto \tilde{i}_0(-x', -y').$$

正弦光栅的频谱是三项 δ 函数之和, 注意空间频率 f 相当于这里的 $x'/\lambda F$, 于是

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_2\{\tilde{i}_T(\xi, \eta)\} &\propto t_0 \delta\left(\frac{x'}{\lambda F}\right) \\ &\quad + \frac{t_1}{2} \left[\delta\left(\frac{x'}{\lambda F} - f_0\right) + \delta\left(\frac{x'}{\lambda F} + f_0\right) \right]. \end{aligned}$$

故

$$\begin{aligned} \tilde{U}_1(x', y') &\propto \tilde{i}_0(-x', -y') * \left\{ t_0 \delta\left(\frac{x'}{\lambda F}\right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{t_1}{2} \left[\delta\left(\frac{x'}{\lambda F} - f_0\right) + \delta\left(\frac{x'}{\lambda F} + f_0\right) \right] \right\} \end{aligned}$$

利用 δ 函数卷积的性质, 得

$$\begin{aligned} \tilde{U}_1(x', y') &\propto t_0 \tilde{i}_0(-x', -y') \quad (0 \text{ 级象}) \\ &\quad + \frac{t_1}{2} \tilde{i}_0(-x' + \lambda F f_0, -y') \quad (+1 \text{ 级象}) \\ &\quad + \frac{t_1}{2} \tilde{i}_0(-x' - \lambda F f_0, -y') \quad (-1 \text{ 级象}), \end{aligned}$$

上式中的三项代表三个象, 0 级象仍在中心, ± 1 级象分别沿 x' 方向移位 $\pm \lambda F f_0$.

以上结论其实可经过简单的推论得到: 物平面的图象可看成是点源的集合, 每个点源发出的波经正弦光栅衍射后在象面上产生 0, ± 1 级三个衍射斑, 故所有物点发出的波在象面上集合为 0, ± 1 级三个象.

[例2] 若将上例中的正弦光栅沿 ξ 方向平移一个距离 Δ , 会产生什么后果?

[解] 与例 1 唯一的差别是 $\tilde{i}_T(\xi, \eta)$ 的表达式应改为

$$\tilde{i}_T(\xi, \eta) = t_0 + t_1 \cos 2\pi f_0(\xi - \Delta),$$

从而在其傅里叶变换式中出现附加相因子

$$\exp\left(\frac{-ikx'}{F} \Delta\right);$$

$$\mathcal{F}_2\{\tilde{i}_T(\xi, \eta)\} \propto \left\{ i_0 \delta\left(\frac{x'}{\lambda F}\right) + \frac{i_1}{2} \left[\delta\left(\frac{x'}{\lambda F} - f_0\right) + \delta\left(\frac{x'}{\lambda F} + f_0\right) \right] \right\} \exp\left(\frac{-ikx'}{F} \Delta\right).$$

取卷积后,得

$$\begin{aligned} \tilde{U}_1(x', y') &\propto i_0 \tilde{i}_0(-x', -y') \quad (0 \text{ 级象}) \\ &+ \frac{i_1}{2} \tilde{i}_0(-x' + \lambda F f_0, -y') e^{-i2\pi f_0 \Delta} \\ &\quad (+1 \text{ 级象}) \\ &+ \frac{i_1}{2} \tilde{i}_0(-x' - \lambda F f_0, -y') e^{i2\pi f_0 \Delta} \\ &\quad (-1 \text{ 级象}), \end{aligned}$$

上式表明,正弦光栅平移的后果是引起相移。0级无相移,±1级朝相反方向移相 $2\pi f_0 \Delta$ 。对于非正弦光栅,还将出现最高级的象。可以证明± n 级象的相移为

$$\Delta\varphi = \pm 2\pi n f_0 \Delta. \quad (6.4)$$

这些相因子的出现并不影响象面上的强度分布。这一点我们是比较熟悉的,应注意的是,滤波器(光栅)的平移将在各级衍射斑的复振幅中引起不同的相移。利用这种相移可以进行图象的加减运算。

二、空间滤波实验

这里再介绍几类更有趣的空间滤波实验,这些实验都可在 $4F$ 系统中作出。

1. 网格实验

输入图象是一正交的网格(正交密接黑白光栅)。在变换平面 T 上的频谱如图6.3(a)所示,是二维的矩形点阵(准分立谱)。 T 面上无阻挡时象面上输出的网格图象完全复原¹⁾。如果按图6.3(b)所示,遮掉 T 面上除中央一纵列外所有其余的衍射斑,则输出面上只剩下横向网纹。反之,若按图6.3(c)所示,只让中央一横行衍射斑通过,则输出的只有纵向网纹。保留中央一斜排的情况[图6.3(d)]也类似。这些现象如何说明的问题,留给读者自己考虑。

最有趣的是图6.3(e)所示的实验。这里输入图象除正交网格外,还有散乱的若干污点。我们的任务是通过信息处理的手段去识别或抹掉

	输入图象 O	变换平面 T	输入图象 I	说明
(a)				全通
(b)				保留 f_x 频谱
(c)				保留 f_y 频谱
(d)				保留 f_0 频谱
(e)				波的频谱用 a 的网片遮

图6.3 网格的空间滤波实验

这些污点。

由于污点的空间信息是无规的非周期分布,它们的频谱弥漫地分布在傅氏面 T 上;而网格的频谱如前所述,是二维的矩形点阵,它是准分立谱。

设想我们先用一纯净的同样网格为物,在傅氏面上直接安放照相底片,将它的频谱拍摄下来,得到一张负片(即黑点阵)。现以这张负片为光学滤波器,去处理有污点网格的图象,这时网格的准分立频谱就被全部滤掉;但污点的频谱经负片滤波虽也丢失一些,但因它是弥漫分布的,绝大部分被保留下来。这样,在输出象面上网格全部隐去,只剩下污点的信息。用这种方法,我们可以从网格图象中把散乱的污点识别出来。如果我们把负片翻印为正片(即白点阵),用它作光学滤波器去处理那个有污点的网格图象,在输出的象面上我们将得到去掉污点的纯净网格。

总之,如要从输入图象中提取或排除某种信息,就要事先研究这类信息的频谱特征,然后

1) 严格说来,由于透镜的有限孔径,高频信息总要被截掉一些,输出的网格图象的黑白边界会变得不如原来清晰。

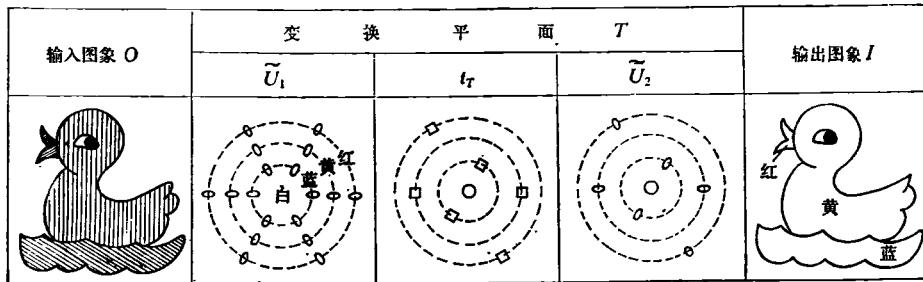


图 6.4 θ 调制实验

针对它制备相应的空间滤波器置于变换平面。经第二次衍射合成后,即可达到预期的效果。光学信息处理的精神大体就是如此。

2. θ 调制实验(分光滤波实验)

这是一类用白光照明透明物体,而在输出平面上得到彩色图象的有趣实验。透明物由几块不同形状的光栅片拼成,这些光栅片是在 50/mm 或 100/mm 的一张光栅上剪裁下来的。拼图时利用光栅的不同取向把准备“着上”不同颜色的部位区分开来。当一束白光照射到这透明物上时,在变换平面上呈现的是沿不同方向铺展的彩色衍射斑。用黑纸或熏烟的玻璃板遮在变换平面上,并在适当的地方开些透明窗口,把所需颜色的 ± 1 级衍射斑提取出来。这样,在输出平面上得到的就是符合我们期望的彩色图象。

3. 反衬度反转实验(加减法运算)

如图 6.5 所示,以正弦光栅作为滤波器,将它插在频谱面 T 处。物平面 O 上有两块光屏,其中 A 代表待处理的图象, B 是一个开孔。按照本节例题 1 的分析,在象平面 I 上应呈现每个光屏的三个象: A_0, A_{+1}, A_{-1} 和 B_0, B_{+1}, B_{-1} 。调节物面上 A, B 的距离,使象面上 A_{+1} 与 B_{-1} 重合。如果两者之间没有位相差,则此处实现了相加的运算。要进行相减的运算,需要设法使两者之间产生位相差 π 。这可通过正弦光栅的平移来实现。如本节例题 2 中所分析的,正弦光栅平移时, $+1$ 级和 -1 级象的位置不变,但产生相反的相移。当滤波器平移的距

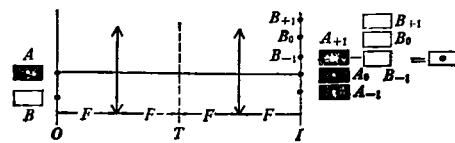


图 6.5 反衬度反转实验

离 Δ 合适,使 A_{+1} 与 B_{-1} 分别产生 $\pm \frac{\pi}{2}$ 的相移时 ($k_0 \Delta = \pi/2, \Delta = d/4, d$ 为光栅常数),两者的振幅就相减了。相减的结果,原来 A 内振幅大的地方变小了,振幅小的地方变大了(见图 6.6),实现了反衬度的完全反转。如果我们继续移动光栅,每隔 $d/2$ 的距离就重复出现一次这种景象。

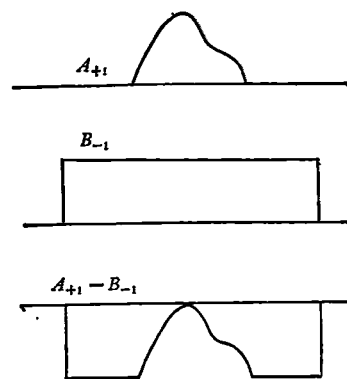


图 6.6 振幅的减法

作本实验时若不易获得正弦光栅,也可用一块 $d/a = 2$ 的黑白光栅代替。