

到的钠离子初始能量分布 $n_0(H)$ 与外加电场有关^[11]。所以,今后对离子陷阱发射几率与外加电场间的关系的研究可能是大家感兴趣的问题。热激离子电流法也许是开展这方面研究工作的最理想的实验方法。

2. 关于离子陷阱的起因问题。迄今为止,已有大量实验事实证明在氧化层的两个界面处存在有大量离子陷阱。但是,对这些离子陷阱的物理本质以及形成原因现在尚不清楚。Williams 等人^[12]认为镜象力是引起界面陷阱的原因,也是引起钠离子在氧化层中运动极性不对称的原因。但是,他们的解释并不能十分令人信服。例如好多实验^[10,18]都表明 Au/SiO₂ 界面与 Al/SiO₂ 界面陷阱情况并不十分相同,Williams 等人的镜象力理论对此现象就不能很好说明。所以,有关离子陷阱的起源问题还有待于今后作大量的实验和理论方面的研究工作。

3. 关于氧化层内的内建场问题。根据空间电荷模型计算得到的理论曲线,准静态离子电流峰值应出现在电压原点,即电流峰值应出现在氧化层电场等于零的地方。但是,由准静态的三角波电压扫描法测量得到的实验曲线,峰值往往偏离电压坐标原点。这是由于在氧化层中原来已存在有内建场。产生这些内建场的主要原因是电极金属与硅之间的接触电势差、荷电的界面态以及氧化层内的固定正电荷。很显然,这些电荷中心对钠离子的运动将会产生影响。因此,对氧化层内的内建场的进一步研究

不仅有助于进一步弄清楚钠离子的运动规律,而且还有助于弄清楚氧化层内电荷中心的分布情况。

总之,对钠离子在氧化层中的运动规律,人们已做了大量工作,并已初步建立了上述两种模型。但是这两种模型现在还很不完善。必须更进一步地做大量的实验和理论方面的研究工作,才能使它们逐步完善起来。

参 考 文 献

- [1] R. Williams, *J. Vac. Sci. Technol.*, **11** (1974), 1025.
- [2] G. F. Derbenwick, *J. Appl. Phys.*, **48**(1977), 1127.
- [3] 徐至中, 电子技术译丛, **1**(1979), 1.
- [4] S. R. Hofsten, *IEEE*, **ED-13** (1966), 222.
- [5] N. J. Chou, *J. Electrochem. Soc.*, **118** (1971), 601.
- [6] J. E. Sandor, *Proc. IEEE*, **57** (1969), 1184.
- [7] E. H. Snow et al., *J. Appl. Phys.*, **36** (1965), 1664.
- [8] S. R. Hofstein, *IEEE*, **ED-14** (1967), 749.
- [9] C. M. Osburn, S. I. Reider, *J. Electrochem. Soc.*, **120** (1973), 1369.
- [10] T. W. Hickmott, *J. Appl. Phys.*, **46** (1975), 2583.
- [11] M. R. Bondry, J. P. Stagg, *J. Appl. Phys.*, **50** (1979), 942.
- [12] M. Kuhn, D. J. Silversmith, *J. Electrochem. Soc.*, **118** (1971), 966.
- [13] 徐至中, 半导体技术, **3**(1979), 69.
- [14] A. G. Tangena et al., *J. Appl. Phys.*, **49** (1978), 2876.
- [15] V. P. Romanov et al., *Phys. Stat. Sol. (a)*, **53** (1979), 493.
- [16] J. M. Eldridge, D. R. Kerr, *J. Electrochem. Soc.*, **118** (1971), 986.
- [17] R. Williams, M. H. Woods, *Appl. Phys. Lett.*, **22** (1973), 458.
- [18] S. I. Raider, R. Flitsoh, *J. Electrochem. Soc.*, **118** (1971), 1011.

编 码 孔 三 维 分 层 成 像

刘立人 殷耀祖 赵丽英 许臣良

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

在 X 光医疗诊断或核子成像等方面,三维物体的特定断层成像是极有意义的。除了已有的分层照相法外,近来发展了分层合成,计算机断层扫描装置等,编码孔成像技术也是一种重要的途径^[1]。它的显著特点是装置简单,一次曝

光就记录了全部信息,并能进行实时动态显示。X 光编码孔成像用了无冗余 (Nonredundant) 点分布函数和在傅里叶变换的空间频率域中解码的方法^[2]。常用光学,电子模拟或数字计算等方式^[3],其中以光学处理最简单和实现可能性

最大^[4]。当使用像变换管时也还能进行实时显示^[5]。已报道了这种技术的心血管断层造影^[6]。

我们的工作着重用非相干光进行信息处理。在介绍了编码孔分层成像的原理后,本文先分析层次分辨率,然后提出并讨论几种用普通白光进行解码的新方法。一种是假彩色分层,从改变波长来改变傅里叶谱的大小,能用不同的彩色显示不同的断层,增强层次感。另一种直接用光卷积计算机解码,或用透镜列阵进行反向投影成像,装置简单,像质较好,能不用相干光像变换管实现实时处理。

一、编码孔成像原理

编码孔成像早已广泛应用于雷达,射电天文学等领域,它是用小孔径的天线或透镜来取得大口径孔径的成像。在这里所讨论的短波范围(X射线或 γ 射线)内,编码孔方法主要用于解决层析成像问题,同时也为了提高信噪比。早先的这种编码孔方法实质上是用非相干光来模拟全息照相的,因为在全息照相中,一个物点可以看作在全息图上产生一个菲涅耳环带;因此可以用菲涅耳波带片作模板,使一个短波非相干光物点经菲涅耳波带片投影而被记录在底片,就是说一个物点编码成一个菲涅耳波带。当用相干光再现这一编码照片时,由菲涅耳波带片的成像性质,类似于全息再现,将再现出各物象。由于这种所谓连续式编码孔方法中分离直流分量的困难,以及只能用于物体本身发光的情况,因此又发展了点分布的编码孔成像,它还容易获得有利于层分辨的广角口径。

三维物体的点分布编码孔成像分为主动式(透射式)和被动式(发射式)两种。前者X或 γ 射线源按编码点分布位置排列,照射物体成编码图。后者物体本身就是发射源,然后通过编码孔径形成编码图,见图1。

两种情况下像平面上的像分布为
主动式:

$$S(x, y) = \sum_{i=0}^j P_i \left(-\frac{a_i}{b_i} x, -\frac{a_i}{b_i} y \right)$$

$$\otimes O_i \left(\frac{a_i}{s} x, \frac{a_i}{s} y \right), \quad (1)$$

其中 \otimes 代表卷积积分。 O_i 为物体第*i*断层在像平面上的投影,像放大率 $n_i = \frac{s}{a_i}$ 。 P_i 为编码孔点分布*P*对于物体第*i*层中点在像平面上的点分布,放大率为 $m = -\frac{b_i}{a_i}$ 。

被动式:

$$S(x, y) = \sum_{i=0}^j O_i \left(-\frac{a_i}{b} x, -\frac{a_i}{b} y \right) \otimes P_i \left(\frac{a_i}{s_i} x, \frac{a_i}{s_i} y \right). \quad (2)$$

其中像放大率 $n_i = -\frac{b}{a_i}$,点分布放大率 $m_i = \frac{s_i}{a_i}$ 。

P 现用无冗余点分布,因为它能给出解码时所必需的近似 δ 函数的最好的自相关^[7]。实践上几个点的点分布的自相关函数不可能是 δ 函数,只能也是具有主瓣和副瓣的点分布函数。无冗余的含意就是主瓣强度为*n*而副瓣强度只能为1。换言之,除了相关中心外,其余部分最多只能相关一个点。因此无冗余点分布的自相关函数最接近 δ 函数并总共产生 $n^2 - n + 1$ 个点,其中主瓣信号亮度为*n*,旁瓣噪声为1。图

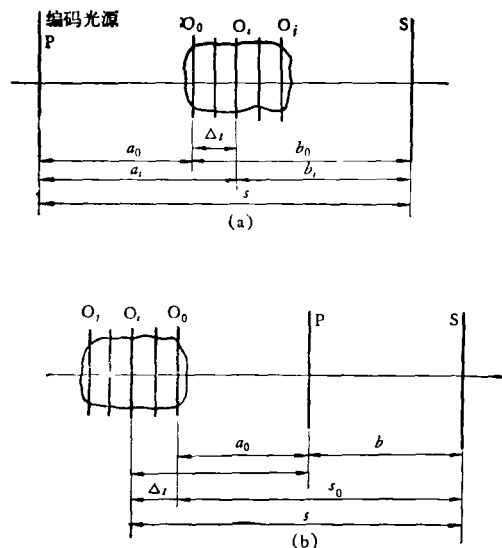


图1 编码图记录光路
(a) 主动成像系统; (b) 被动成像系统

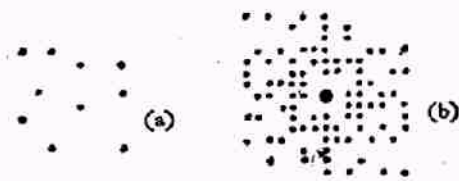


图2 (a) 点分布; (b) 自相关函数

2是 $n = 10$ 的无冗余点分布及自相关函数。

下一步是对迭加像的编码图 S 分层译码。在透镜傅里叶变换的频域内可用全息匹配滤波器作相关或逆滤波器作相除。以下只考虑相关法。

这时可先把物体前第 0 层上的点分布 P_0 记于傅里叶全息图中。然后用图 3 的关系分层译码。当输入编码图时输出为

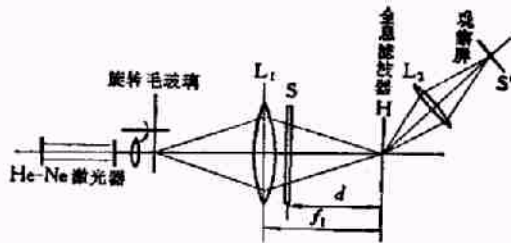


图3 傅里叶光学系统分层解调

$$S'(x_2, y_2) = K \sum_{i=0}^3 O_i \left(\frac{dx_2}{nif_2}, \frac{dy_2}{nif_2} \right) \otimes P_i \left(\frac{dx_2}{mif_2}, \frac{dy_2}{mif_2} \right) * P_0 \left(\frac{f_1x_2}{mof_2}, \frac{f_1y_2}{mof_2} \right), \quad (3)$$

其中 * 代表相关积分。显而易见, 变化编码图 S 的位置 d , 使某一断层的点分布 $P_k = P_0$, 这时:

$$s' = O_k \otimes P_0 * P_0 + \sum_{\substack{O_i \neq O_k \\ P_i \neq P_k}} O_i \otimes P_i * P_0 \cong O_k \otimes \delta = O_k$$

即已处理出一个断层像 O_k , 连续移动编码图就可以得到各断层的像。

某一断层像所需编码图的位置可由 (3) 式引出, 即使 $\frac{d}{mif_2} = \frac{f_1}{mof_2}$, 由此:

主动式:

$$d = j \frac{a_0(b_0 - \Delta_i)}{b_0(a_0 + \Delta_i)}, \quad (4)$$

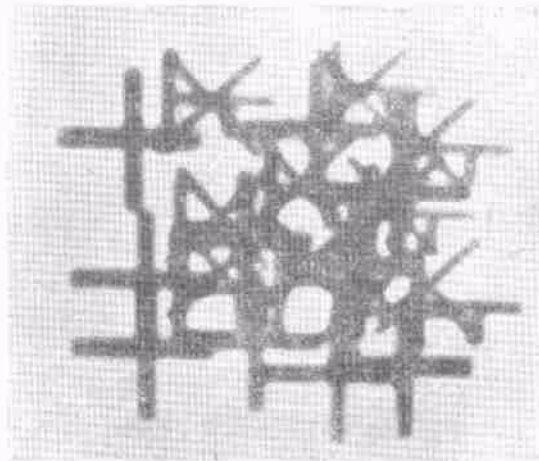


图4 编码图

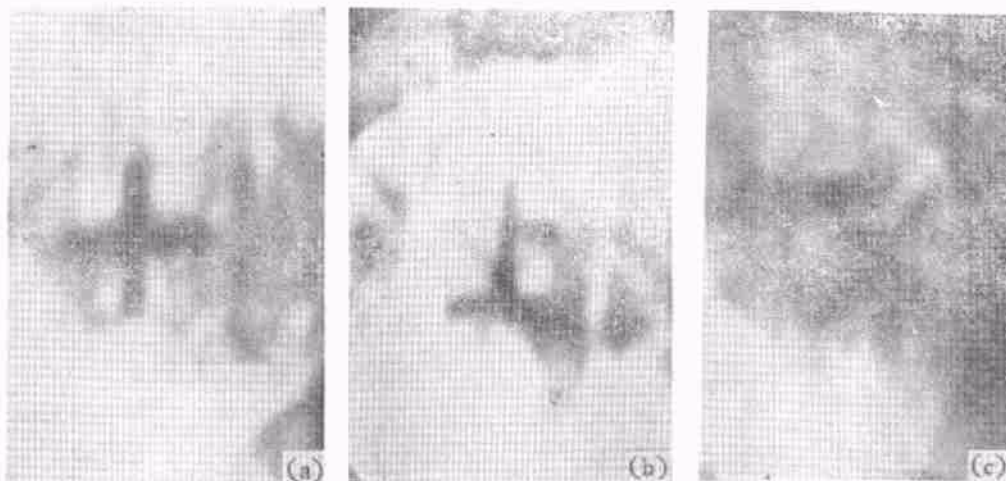


图5 分层象

被动式:

$$d = f \frac{a_0(s_0 + \Delta_1)}{s_0(a_0 + \Delta_1)} \quad (5)$$

为了消除光学系统的缺陷和相干噪声,现采用非相干光。旋转毛玻璃就是为了得到非相干光。

用光学成像装置模拟被动式编码孔进行了一些实验。孔分布最小间距 2mm,直径 0.5mm, b 为 12cm, a_0 为 10cm, Δ_1 为 2cm, Δ_2 为 7cm, 字形分别为“+”,“上”,“×”所得编码图见图4。实验中所用透镜均为 ϕ 50mm, f 200mm 的双胶合物镜。图 5 分别是 d 为 200, 180, 150cm 时所得的分层像。

二、层次分辨率

层次分辨率是极重要的参数,分析分辨率首先要确定它的判据。在相关法中, P_0 是全息图中记录的点分布。若 k 层的点分布与 P_0 相同,则 k 层像被解码。若与其相邻近层的点分布刚好只和 P_0 相关一个点,这时层间距离 $\pm \delta$ 就定义为层次分辨率。

相关一个点的条件用图 6 表示, P_0 点分布中的最小间距为 $x_{0\min}$ 。那么层间距离增减 δ 时,点分布相应按比例增大或缩小,这时应使一个点与 P_0 重合,其余点不重合。在图中就是使一个点重合,另一个点刚好不相交。

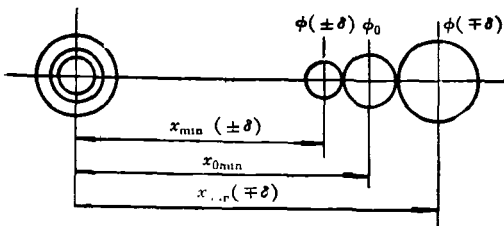


图 6 非冗余点分布只相关一个点的条件

ϕ_0 为 P_0 的孔直径, $\phi(\delta)$ 为相邻 δ 层的孔直径,那么应当有

$$\pm x_{0\min} \mp x_{\min}(\pm\delta) = \phi_0 + \phi(\delta) \quad (6)$$

由式 (1), (2) 代入各项比例因子:

对于主动式:

$$\begin{aligned} \pm \frac{b_i}{a_i} x'_{\min} \mp \frac{b_i - \delta}{a_i + \delta} x'_{\min} \\ = \frac{b_i}{a_i} \phi' + \frac{b_i - \delta}{a_i + \delta} \phi', \end{aligned}$$

其中 x_{\min} 和 ϕ' 分别是原始点分布 P 上的最小间距和孔(焦斑)直径。并令

$$m = \frac{\phi'}{x_{\min}},$$

则有

$$\delta = \frac{2a_i b_i m}{\pm s + m(a_i - b_i)} \quad (7)$$

同样,对被动式:

$$\delta = \frac{2s_i a_i m}{\pm b - (s_i + a_i)m} \quad (8)$$

可以看到,点分布 P 的 m 值愈小则有利于分辨率。在主动式像系统中,当 $a_i \rightarrow 0$ 或 $b_i \rightarrow 0$ 时分辨率最高,在被动系统中,当 $a_i \rightarrow 0$ 时分辨率最高。上述讨论说明,相关法解码层分辨率只取决于记录时的光路布置,而与解码系统无关。因此这些分析均适用于本文中的各种相关解调。

层次分辨率也能表现为编码图位置移动的分辨率。由 (4), (5) 微分并使 $\frac{\Delta(d)}{\Delta(\Delta_i)} = \frac{\Delta(d)}{\delta}$ 则有

主动式:

$$\frac{\Delta(d)}{d} = - \frac{2sm}{\pm s + m(a_0 - b_0 + 2\Delta_i)} \quad (9)$$

被动式:

$$\frac{\Delta(d)}{d} = - \frac{2bm}{\pm b - m(s_0 + a_0 + 2\Delta_i)} \quad (10)$$

当 $m \ll 1$ 时,

$$\left| \frac{\Delta(d)}{d} \right| \cong 2m.$$

三、假彩色分层成像

傅里叶变换的空间频率与分布尺寸的关系为: $x = \lambda f f_x$, $y = \lambda f f_y$ 。这意味着谱分布不仅可以由改变焦距调整,也可改变波长来加以调整,因此有可能用改变波长的办法进行分层解码,这能产生彩色分层的效果。现采用白光分

光的办法产生单色光，问题在于单色性带宽必须在层次分辨率所允许的范围内。

先讨论分层解码所需波长，若傅里叶变换透镜焦距为 f_1 ，所用波长为 λ_1 ，解码时编码图位置为 d ，则所需波长为 λ_2 。同样根据点分布的比例因子和透镜变换的标度性质：

对主动式：应有

$$\frac{\lambda_2 d}{\lambda_1 f_1} = \frac{a_0(b_0 - \Delta_f)}{b_0(a_0 + \Delta_f)}$$

则

$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{f_1 a_0 (b_0 - \Delta_f)}{d b_0 (a_0 + \Delta_f)} \quad (11)$$

对被动态：

$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{f_1 a_0 \epsilon_0 + \Delta_f}{d a_0 \epsilon_0 + \Delta_f} \quad (12)$$

应当注意的是要控制 λ_2 在可见光范围中。由式(9)，(10)微分并令

$$\frac{d(\lambda_2)}{d(\Delta)} = \frac{\Delta(\lambda_2)}{\delta}$$

代入层分辨率式(7)，(8)，则可求得带宽分辨率：

主动式

$$\frac{\Delta \lambda_2}{\lambda_2} = - \frac{2sm}{\pm s + m(a_0 + b_0 + 2\Delta_f)} \quad (13)$$

被动式

$$\frac{\Delta \lambda_2}{\lambda_2} = - \frac{2bm}{\pm b - m(s_0 + a_0 + 2\Delta_f)} \quad (14)$$

它们与位置分辨率(9)，(10)一致，当 $m \ll 1$

时， $\left| \frac{\Delta \lambda_2}{\lambda_2} \right| \cong 2m$ ；若 $m = 0.1$ ，相对带宽为 0.2，

相当于 4 \AA 以内。这种要求完全可用棱镜单色仪分光达到。

这里仍用上节编码图做实码。解码系统见图7。光源用色谱较好的钨灯，分光棱镜顶角 60° ，材料 ZF₁，结果见图8。a 和 a' 为 $\phi 1$ 和 $\phi 0.5 \text{ mm}$ 。

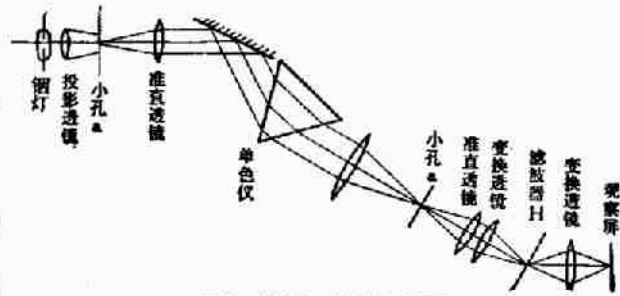


图7 假彩色分层解码装置

四、直接相关解码

前两个系统中为实现相关运算，像处理是在空间频率域中进行的。现直接在空间域中实现相关。图9的离焦成像系统能直接进行透明物体 τ_1 和 τ_2 的卷积积分，这可以用非相干的扩展光源。其中有两种情况，一种是 τ_2 在透镜前，另一种在透镜后。

可分别推得^[6]输出点的强度。

第一种 τ_2 在透镜后：

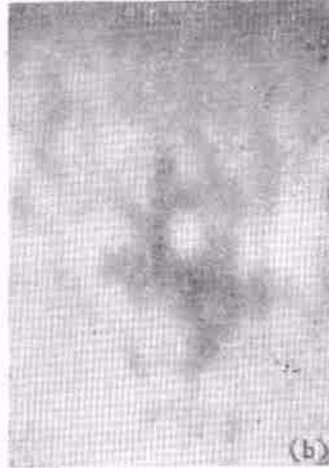


图8 假彩色分层像
(a) 蓝色；(b) 黄绿色；(c) 红色

$$I(-x_d, -y_d) = K \iint_{-\infty}^{\infty} \tau_1(x, y) \tau_2 \left[\frac{l_2 - d}{\Delta} (x_d - \frac{(l_2 - d + \Delta)l_2}{(l_2 - d)l_1} x) - \frac{(l_2 - d + \Delta)l_2}{(l_2 - d)l_1} y \right] dx dy. \quad (15)$$

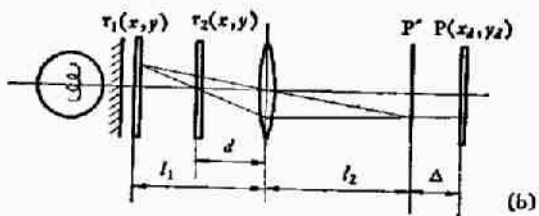
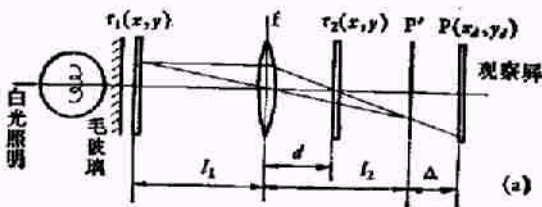


图9 光卷积计算机

第二种 \$\tau_2\$ 在透镜前:

$$I(-x_d, -y_d) = K \iint_{-\infty}^{\infty} \tau_1(x, y) \tau_2 \left\{ \frac{(l_1 - d)l_2}{\Delta l_1} \cdot \left[x_d - \left(1 + \frac{\Delta}{l_1} - \frac{\Delta d}{l_2(l_1 - d)} \right) x \right] - \frac{(l_1 - d)l_2}{\Delta l_1} \left[y_d - \left(1 + \frac{\Delta}{l_1} - \frac{\Delta d}{l_2(l_1 - d)} \right) y \right] \right\} dx dy. \quad (16)$$

其中 \$P'\$ 为成像面, \$\Delta\$ 为离焦量, \$l_1\$ 与 \$l_2\$ 分别为物距和像距, \$P\$ 为输出面。显然, 这两式表示了 \$\tau_1\$ 和 \$\tau_2\$ 的卷积, 因此只要旋转 \$180^\circ\$ 其中任一膜片, 就得到相关运算。进一步分析这两个式子, 也可看出, 当系统参数适当变化时, 这两个式子本身就可能是相关积分。因此这种光计算机能直接用于编码图的解调。

除了用透镜系统外, 由图 1 所说明的编码图产生的过程, 也可以由反向投影方法得到最终的分层像, 图 10(a) 用三孔表示, 编码图经白光照明后仍由编码孔反向投影成像。其解调条

物理

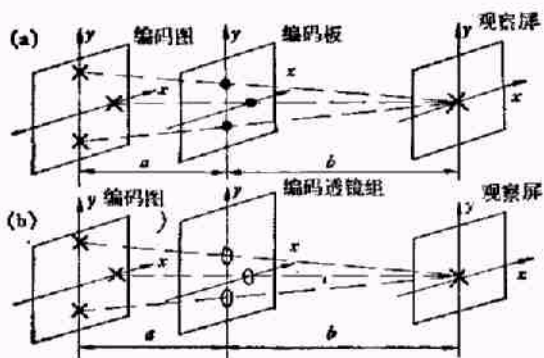


图10 (a) 反向投影; (b) 编码透镜列阵成像

件应为

$$m_i = \frac{b}{a + b}, \quad (17)$$

而 \$m_i = \frac{P_0}{P_i}\$, \$P_0\$ 为孔板点分布, \$P_i\$ 为三层物的点分布。显然, 这种反向投影也是相关积分运算^[9]。

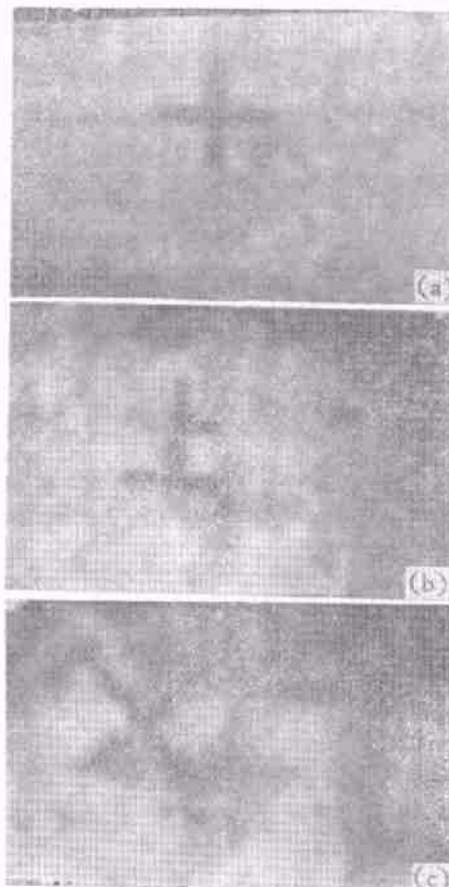


图11 相关光计算机分层象

这些相关解调中,存在两个缺点:光通量很小,及其相关解调过程中,再一次由于孔形的有限尺寸而降低分辨率。为了克服这些困难,现采用透镜列阵的方法进行反向成像[图10(b)]。显然,能增加通光量并消除解调过程中的分辨率下降。

这时应满足解像条件(17)和成像关系

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (18)$$

因此,分层成像条件为

$$m_i = \frac{f}{a} \quad (19)$$

图11是用 $\phi 50$ 、 $f200$ 透镜的离焦系统所得的分层像。

五、结 语

非相干光编码孔分层成像,假彩色分层,光计算机分层和反向投影几种方法均基于相关解调。但前两种系统用于全息滤波器,它的制作和工作性质带来一定问题,因此成像质量较差。但彩色分层具有彩色像特点。后两种方法的像质较好,装置也最简单而且与光源波长无关。透镜列阵又能大大提高成像亮度,因此突出的优点是不需像变换管就可能实现实时动态显示,

图12是一种已成功的实验方案。由于应用电视系统,可以在电信号中进行阈值或非线性模拟处理,以提高信噪比。

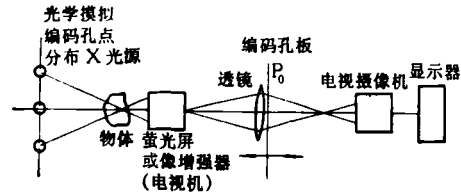


图12 实时处理模拟系统

由于无冗余点分布自相关函数有许多旁瓣,因此存在一定噪声,为此提高信噪比和深入研究点分布函数都是急待进行的。更进一步的工作是要在X光机上做实物判断。

本工作由王之江同志提出并具体指导。

参 考 文 献

- [1] D. Meyer-Ebrecht, *IEEE Spectrum*, **14**(1977), 46.
- [2] E. Kloz et al., *Opt Commun.*, **11** (1974), 362.
- [3] H. Weiss et al., *Optica Acta*, **24**(1977), 305.
- [4] 王之江, *国外激光*, **11**(1977), 1.
- [5] H. Weiss et al., *IEEE Trans. Comput.*, **C-24** (1975), 391.
- [6] E. Klotz et al., *Appl. Opt.*, **15** (1976), 1918.
- [7] M. Golay, *J. Opt. Soc. Amer.*, **61** (1971), 272.
- [8] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, (1968), 163.
- [9] M. Monahan et al., *PIEEE*, **65** (1977), 121.

发展中的强流离子光学

方 锦 清

(中国科学院原子能研究所)

一、引 言

在近代科学技术的众多领域和工业中,各种等离子体离子源及离子束技术获得了广泛的应用,并正在大力研究和发展中。例如,各种粒子加速器,受控聚变研究、静电离子空间推进器、电磁同位素分离器、离子注入机、离子束加

工新工艺、表面科学、材料科学等等领域中,离子源及离子束都是关键设备之一和不可缺少的研究手段,意义十分重要。

值得注意的是,奇妙多彩的离子束不论在何种领域的应用,普遍感兴趣的重要课题,就是离子束的离子光学特性。由于近代科技发展和人类对能源的紧迫需要,例如在受控聚变研究中,要求强流离子束连续注入高达几十至百安