

用热塑膜进行实时电子图象转换

摘要: 通过所施加的电荷密度分布的静电力, 使热塑膜在瞬间加热时形变成一种浮雕物。它可经过较强的加热脉冲而重新变平。文章指出, 热塑膜可用来作为电子图象的快速、可擦除的存储器, 它能够及时地制成光学衍射图。为达到照相干板的灵敏度, 图象电流密度用一电路倍增板增强。文中谈到热塑转换器几项特性测量, 并据其他人的研究结果进行了讨论。非晶形炭膜粒化的“实时”衍射图, 可由 10^{-10}C/cm^2 以下的电荷密度而获得。定量的图象选择, 由于非线性特性曲线及其他一些仍须详细研究的干扰而受到影响。

作者, K.H.Herrmann, D.Krahl

1. 引言

电子显微镜的图象信息是通过一种在最终象面上平面电荷密度分布而得, 它通常是用照相干板的密度来表示, 并转变为一种可以用光学的手段进行评价或进一步处理的形式。照相干板的优点是它的像点数目大, 电子的量子效率高, 然而, 遗憾的是它的处理时间长, 以致排除了为直接反作用于显微镜而对图象信息进行评价的各种方式。最近也许有可能采用一种方法, 即在记录之后不久就可以进行评价。

配有图象存储器的高灵敏度图象增强装置是解决这一任务的有效途径[1], 当然, 这些设备花费很大, 在图象点数方面, 由于电传真扫描系统而受限, 此外, 为完成苛求的图象处理, 即使谈得上一种“实时”方法, 还要求附加一台快速数据引导大型计算机。这点对在高分辨率电子显微镜方面经常

提出的、对图象进行一次或两次付里叶变换的任务而言尤为重要。非晶形载体膜统计粒化的电子显微镜照片, 大多数情况利用激光制成它们的光学衍射图, 衍射图指出了这些照片付里叶变换的方阵, 并以此而说明电子显微镜的传递特性。衍射图不仅可以识别出球差、波长及散焦效应, 而且对可能出现的干扰也可清楚地看出, 因此, 对判断电子显微镜的光学性能非常重要。利用电传真图象增强装置和大屏幕投影装置而得的“联用”衍射计量的方法(即将视频图象转变为相位浮雕图), 在参考文献[3]中已有说明。这种方法的缺点是, 被处理的图象点数受到电传真扫描系统限制。如果用附加电传真图象存储器来满足对积分时间的变动的要求, 那么在器材方面本来已不小的花费还要增多。

二次付显叶变换对于照片的复数空间滤波是必要的, 它被用来使图象信息得到较好的判读。付显叶变换也可结合显微镜的光瞳函数, 用来改善传递函数, 例如对单边带全

个系统得到广泛地使用, 从而省去使用者所要做的组件更换。

除了此种结构所取得的经济成果外, 力求达到在所有熟悉的电视摄象机中都可以使用。摄象机连接板与相应变化焦距的伺服元件, 以及调焦和光阑控制, 对所有的物镜都是相同的, 与集中的光学组件相反, 在这里

使用者可以进行更换。相应的单件在所有由积木方式组成的物镜中也完成可以互相更换。

译自 《Fernseh + Kino - Technik》

1977年 N.7 248页—254页

[张联维译、周毓平、孙静校]

息术。这项工作要用大型计算机来解决，其中，必须把图象信息转变为数字形式。采用相干光学图象处理装置〔4〕可在较高的图象点数时，大为降低费用，然而精度也随之而降低，这里，在成象系统衍射平面振幅与相位的结合，由全息滤频片来实现。

目前，电子显微镜照片的进一步光学图象处理，先决条件是把图象信息存储在照象乾板上。如果我们能用一种图象转换膜来代替照像干板，那么，就会实现一种“实时”的方法，这种图象转换膜是把作为电荷密度分布的已有图象，立即转变为另一种形式，即能够用相干光同时“读出”全部像点。为此，不仅要涉及到由于光密度分布而引起的光束振幅影响问题，而且相位浮雕也将可能完成他的任务（如果已知它包含附属于光密度的每种干板）。这样一种光学装置可能是与电子显微镜联用。这方面已见成效者，我们认为是热塑料薄膜，它已被作为存储介质成功地用于“实时”全息照相〔4〕和电子射束的记录方法中〔5〕。在初次试验〔6〕证实很有希望之后，为了对薄膜的性能做定量研究，并为了寻觅克服这种方法已知缺点的途径，继续进行过多次实验。作为第一次在电子显微镜上的示演，制成了高分辨率膜照片粒化“实时”衍射图。

2. 实验装置

2.1 热 塑 膜

在一块正方形〔(5cm × 5cm) 的玻璃基底上，（它具有透明加热层($R_D \approx 20 \Omega$)，反面有加厚连接电极）涂上约20微米厚的透明有机材料，其软化温度约为60℃。在最初的实验中，使用了Staybelit-Ester 10（松香氢化纯甘油）之后，过度为一种合成物，即由聚苯乙烯/甲基丙烯酸酯构成的共聚物，这种聚合物具有可复现的性能，阻抗电子辐射能力较大〔7〕。

单个脉冲发生器提供加热脉冲直至4A，

其脉冲持续时间于0.1至1秒之间可调，这足以使加热脉冲转变为直至20W/cm²的表面功率密度。

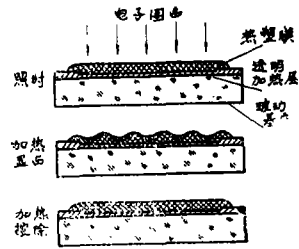


图1 热塑图象转换膜的作用

图1表明转换膜的作用。电荷密度分布形成之后，使膜层瞬间加热至软化温度。此时，膜层由于电荷静电力而产生形变，变为相应于最终图象中电荷密度分布的浮雕图，它可在冷却之后任意保存多长时间。一个更高能量的加热脉冲，使粘度和单位阻力大为降低，通过它可将浮雕图重新变平。这样，图象信息就可擦除，而转换膜可继续循环使用。

2.2 信道倍增板

初步实验〔6〕结果与参考文献〔5〕的评述完全一致，即表明这种方法的灵敏度较照相干板的灵敏度低几个数量级，之后，就在转换膜的紧前面，加上一个信道倍增板（Bendix M 1775，直径25毫米，波道直径40微米）。用这一种办法，在电压加到1000V的情况下，由于二次电子发射而使得电流密度以因数 $1 - 2 \cdot 10^4$ 予以增加。逸出的电子被后加速3KV电压加速至间距约为0.5毫米的热塑膜上。信道板输入端处3.5微米厚的镀铝Mylar膜层，负责使杂散而迟顿的电子和离子隔开〔8〕，液氮冷却循环装置围绕于信道板。

2.3 光学与电子光学装置

在一电子光具座之上，经两级缩小，产生约为0.5微米大的交迭图象，该图象将电解制成的铜网（网距为40μm）以不同的、通过几何选择的放大倍率投影至象转换器上〔图2〕。膜层平面的电流密度，用一法拉

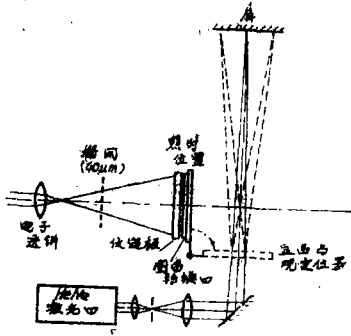


图2 实验装置

第笔测得。

在显象过程的同时，转换器膜层转动 90° ，离开信道板并处于扩展为直径20毫米的激光光束之中（图2），以照像形式显示出聚焦衍射图象。为对转换器膜层进行光学成象，将衍射图聚焦于一成象透镜，并通过一个 $\frac{\lambda}{4}$ 板在零级光线处形成相位衬度。衍射效率由暗场图象各部分强度测量而定，而暗场图象是由衍射图象反射的遮没所致。

对于炭膜照片衍射图形成的实验装置，稍有改变但原理雷同，它被接在 Elmlskops 102 的终端图象摄影机上。扩展为直径20毫米的激光光束经表面反射镜射至热塑膜，并于衍射程长2米处聚焦。

3. 实验结果

正如参考文献[6]中所讲，初步的实验是在 Staybelit 膜层上（无附加信道板，以 $40KV$ 电子）进行。栅网状的电流密度分布（点阵常数为 $180\mu m$ ，振幅为 $1.5nA/cm^2$ ）投影于膜层之上。曝光时间持续在5—50秒之内。通过用0.1秒的加热脉冲逐步提高温度使膜层显象。所产生的衍射图象如图3所示。衍射效率定义为第一衍射级反射的光通量与未变形膜层零级光线的光通量之比，它随着显影时间的增长，形成一钟罩形曲线，其最大值与所照射的电荷密度有关。图4为这种情况的示例。

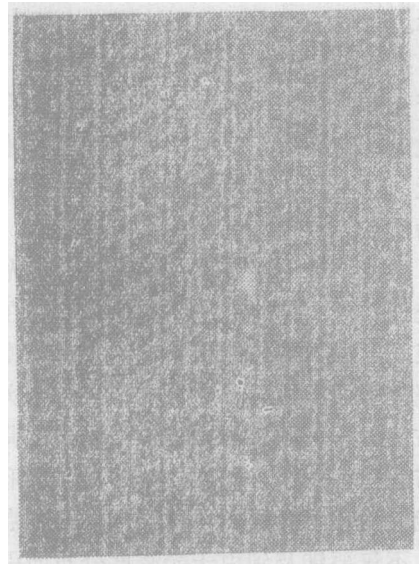


图3 变形 Staybelit 膜的衍射衬比图和相位衬比图。膜层厚度为 $25\mu m$ ，电子能量为 $4KV$ ，点阵常数为 $180\mu m$ ，电荷密度为 $5 \cdot 10^{-8} c/cm^2$

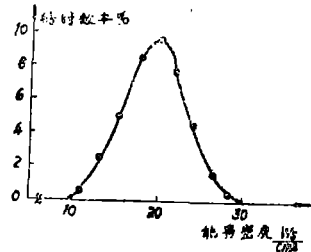


图4：分步显影下的衍射效率加热脉冲为 $2.2 Ws/cm^2$ ，间隔时间约为5秒。其他数据同图3

下述情况得以证明：即由于散热不佳，几次循环之后膜层的基本温度增高。因此，在显影能量逐渐趋小以后的一些循环中，显影曲线产生变化。另外，当点阵常数减小至约为 $50\mu m$ 时，显影能量必须减少一半以上。这就说明：为了对较高的空间频率显影，需要较小的能量，这也相应地适合于擦除过程。

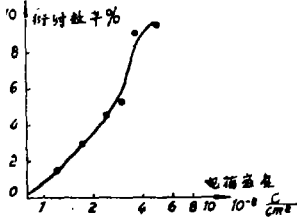


图5 成为电荷密度函数的一种Staybelit膜层的衍射效率(无波道倍增板)膜厚 $25\mu m$ ；电子能量 $40KV$ ；点阵常数为 $180\mu m$

图5以例示出衍射效率与所施加的电荷密度的关系。测量过程中发现测量数据很不一致，这里的一个原因是，一块膜层的衍射效率与相邻试验的时间间隔有关。这就说明，已擦除的膜再次显影而无新的电子辐射时，擦除过程与再次显影之间的时间越长，则所谓“记忆效应”也就越强(见图6)。一部分图象信息以潜在的形式被保留下来。

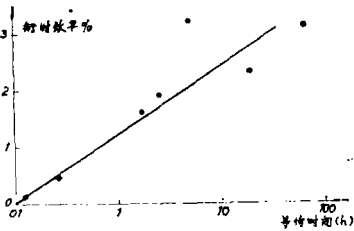


图6 潜象的衍射效率与擦除过程和再次显影之间等候时间的依赖关系。膜厚 $25\mu m$ ，电子能量 $40KV$ 点阵常数为 $50\mu m$

我们不再对这种情况的其他原因进行详细解释，因为特性曲线(图5)不言而喻比照像干板差三个数量级，所以用初级电子直接辐射膜层，对于高分率电子显微镜的实践来说是不适用的。实验采用一种信道板继续

进行(图2)它不仅使灵敏度提高到所要求的程度，而且允许自由选择落于热塑膜的电子能量。

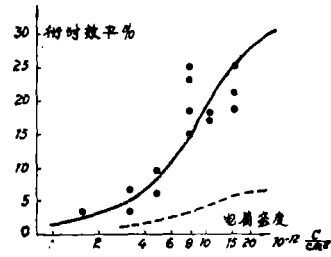


图7 具有信道倍增板的合成热塑膜的衍射效率(以电荷密度为函数)。膜层厚度 $25\mu m$ ；电能能量 $40KV$ ；点阵常数 $180\mu m$ ；信道倍增板电压 $1KV$ ，后加速电压 $2KV$ 。与作为振幅点阵的照相乾板相应的特性曲线，以断线标出

图7表明，该系统灵敏度的特性曲线。目前是在照相干板灵敏度的数量级之内，衍射效率接近于相位点阵理论最大值的33%，这时，首先在光照点阵的衍射图上叠加了信道板模型的衍射图(图8)。在点阵图象最佳显影约在3秒之前，这在其6个对称点上可以看得清楚，并且在提高显影能量时，出现其最大值。图9的一组照片清楚地说明这一情况。前面提到的记忆效应，在用 $25\mu m$ —Staybelit膜层时，只发生于 $40\mu m$ 的信道板模型，而不发生于 $180\mu m$ 的网络图。采用合成膜层时，记忆效应则全部清除。

在相位灵敏度的成像照射过程中，热塑膜的变形可以直接观察到。图8指出信道板模型，图3指出 $180\mu m$ 的网络，而图10所指是用感光漆方法腐蚀而成的测试星点。在测试星点图上，清楚地观察到在衍射图上看到的情况，即随着显影能量的增加，先是高的空间频率，接着是低的空间频率完全显影和擦除。特别是粗糙的结构，例如在星点的边缘部分，甚至几乎不可擦除。同样，在相位对比中特别明显出现的、为数很多的条纹也是这种情况。随着循环次数增加而出现另外的定位扰动，可能系污秽，尘埃所致。

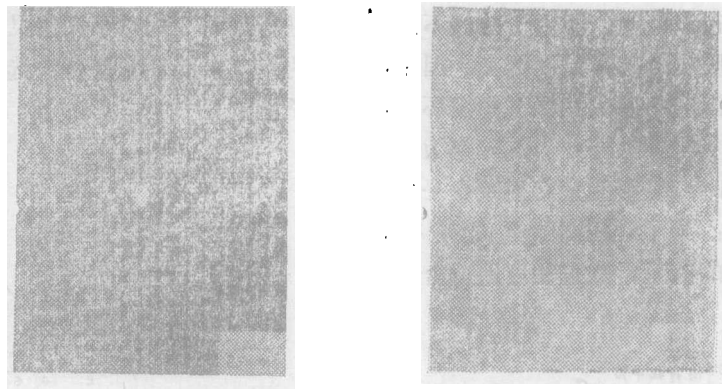


图8 信道板模型，衍射图和相位衬比图

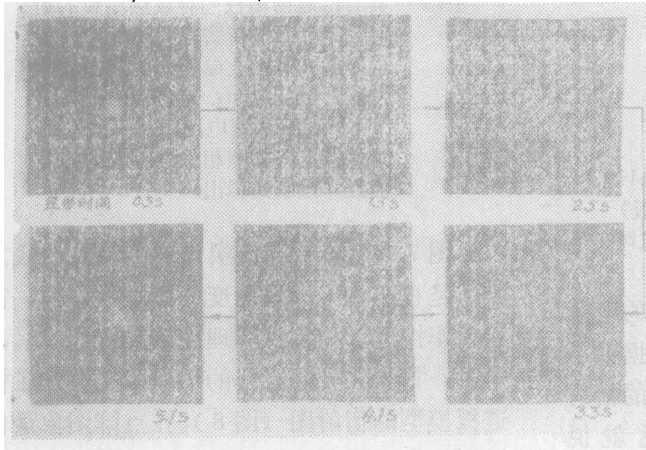


图9 显影系列。随着分步显影，信道板衍射图象在 $180\mu m$ 点阵以前出现其最大值

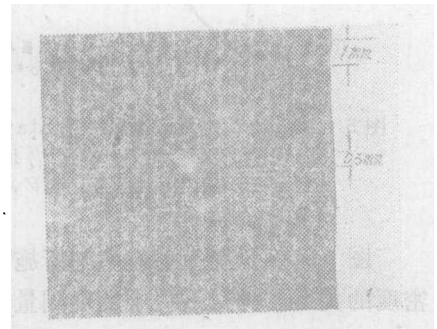


图10 测试星点的相位衬比图电子能量 $40KV$ ；电荷密度 $3 \cdot 10^{-12}c/cm^2$

膜层原理上的寿命限度尚未能予以确定，因为在30—50次循环之后，由于畸变（扰动）的严重增多它将被更换。

大致弄清楚方法的定量特性之后，把薄炭膜的高分辨的电子图象，以150000的电子光学放大倍率进行曝光。图11以例表明衍射

图象，其中，传递函数的零位清晰可见。图11a是由于示范而夸大的像散；图11b是大体校正后的情况；图11c是指间隔30秒钟两次曝光的衍射图。明显的杨氏干涉条纹说明，两次摄影之间产生了偏移，它决定于条纹的距离。

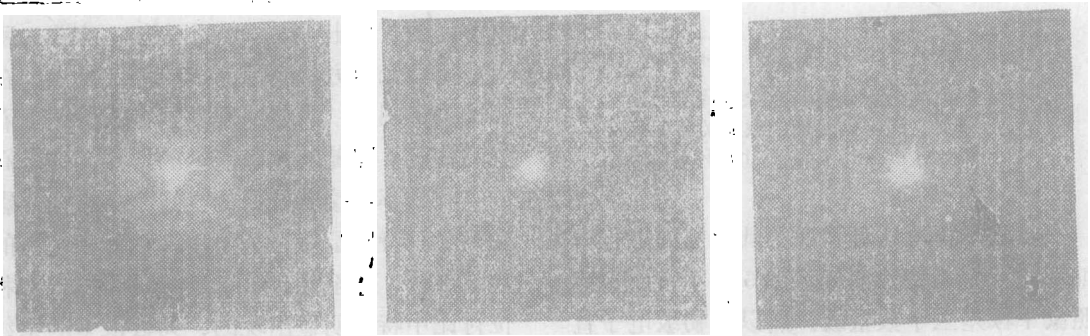


图11 炭膜粒化电子图象的“实时”衍射图。电子能量 $125KV$ ，放大倍率150000电荷密度 $10^{-10}c/cm^2$ a)较大的像散 b)较小的像散 c)叠加衍射图

4. 讨 论

上述实验结果表明：具有信道板的热塑图像转换器可适用于实时衍射术，而且在相应的技术方面进一步发展之后，可使高功效电子显微镜的使用极为方便。但是也应当看到，转换器的机理固然从定性方面是较易理解的，但在定量关系上洞察透彻却是较困难的。所以，我们试图在下面讨论一些最重要的关系，并说明一些实验结果。

粘性的胶质绝缘薄膜由于所施加的电荷密度的分布而引起变形，这属于静电一流体动力学的问题，它已在 Eidophor 方法〔9〕和不同著者〔5、10、11、12〕所述的热塑膜层中进行过研究。

在加热时由于粘度下降而引起的物质运动，通过静电力来完成。

$$p_{el} = \frac{1}{2} \frac{q^2}{\epsilon\epsilon_0} \quad (\epsilon, \epsilon_0 = \text{材料或}$$

真空的介质常数)

它是一种动力学过程，当静电能量与流体静力学能量（它与表面应力反向作用）平衡时，该过程便结束。假设有一周期性的电荷密度层 $q = q_0(1 - \cos 2\pi x)$ ，它以 L 作为周期长度，那么所达到的平衡状态可通过相应的周期性变形 $f(x)$ 而得出，而后者幅值近似为〔5〕：

$$f_0 = \frac{1}{\pi^2} \frac{L^2}{\sigma_0} \frac{q_0^2}{\epsilon\epsilon_0} \quad (1)$$

由此，很快就可以算出所形成相位点阵的衍射效率，它是一级贝塞尔函数的平方

$$\eta = J_1^2 \left[\frac{2\pi}{\lambda} (n-1) f_0 \right] \quad (2)$$

式中 λ 为光的波长， n 为材料的折射率，由这个仅适用于理想情况的关系式可以估算〔5〕，为了达到显著的衍射效率，使电荷密度约为 10^{-8}c/cm^2 是必要的。相反，照相干板只需要约 10^{-11}c/cm^2 ，因为它对电子的电荷没有什么反应，而只是利用电子的能量。

欠缺的灵敏度因素由信道倍增板补偿，如所测得的特性曲线所示出的那样。

关系式(1)和(2)另外说明，衍射效率在初始阶段与 q_0^2 成比例地提高，以便随着调制上升到大约理论最大值的33%时再弯下来。按照(1)式，热塑膜层具有一种随着上升的空间频率 L^{-1} 而下降的传递特性。这种情况只符合于较高的空间频率，其原因在于，膜层的变形只可能是由于物质的运动而引起的，它与周期长度 L （除与 f_0 外）是成比例的。因此，流动过程对于较低的空间频率来说，要求较长的时实，这样一来，高空间频率较低空间频率先行显影与擦除〔12〕。这种情况已经实验证明。平衡关系式(1)在诚然不够准确的假设条件下导出，电荷的分布不是由流动过程所改变的，但是，因随粘度降低有可能出现电荷迁移，所以在达到平衡以前，发生电荷分布的部分裂解，在周期长度小于膜层厚度情况下，它突出表现在横向。假如周期长度大于膜层厚度，那么电荷主要在薄膜法线的方向发生裂解，并在出现明显的膜层变形以前早就如此。当周期长度与膜层厚度 d 相等时，用(1)式说明的热塑转换器的灵敏度随空间频率减小而提高，以后必然趋于降低。按参考文献〔12〕所述，最大变形期望发生于周期长度 $L = 2d$ ，而且在全息存贮器中也可找到〔13〕。幸而“传递周期”已足以使有用的空间频率范围的衍射图得以再现。图11中的衍射图和图10中试验星体图已说明了这一点。再现物体结构的周期长度（0.3—2nm）在150000电子光学放大倍率情况下，显然大于 $2d$ ，并因此而处于一种下述范围，即在这一范围内变形机理不再由按照(1)式的平衡状态标志，而是由前述的电荷裂解来标志。

另外一种复杂情况必然有损于关系式(1)的通用性，如果膜层负有不变的电荷密度，那么，表面应力降低〔11〕：

$$\sigma = \sigma_0 - \frac{1}{2} q_0^2 \frac{d}{\epsilon\epsilon_0} \quad (3)$$

一方面,在将弱的电荷密度调制 q_0 叠加到基底电位的情况下,这种效应应当提高灵敏度(这时由(3)式得出的 σ 代替(1)式的 σ_0)。另一方面,经(3)式也确定了电荷密度的极限

$$q_F = (2\sigma_0 \frac{\epsilon\epsilon_0}{d}) \frac{1}{2}$$

式中 $\sigma = 0$,并因此使薄膜不稳定,之后,提出了命名为“冷冻效应”的膜层自身的变形,在参考文献[11]中 Cressmann 对此作了说明,并在参考文献[12]中,由 Budd 作了理论上的研究。顾及到粘度的流体动力学的计算结果表明,冷冻效应的统计学空间频率分布有一最大值为 $(2d)^{-1}$,因此,从定性来看,它接近于所讨论的传递特性曲线。可想而知,膜层的机理变形,在转换反衬度弱的电子图象时,严重地受到接近“冷冻范围”的影响,代入数值 $\sigma_0 = 36 \text{ dyn/cm}$, $\epsilon = 2.5$ [11],在 $d = 20 \mu m$ 的情况下,相应于冷冻效应的电荷密度极值为 $q_F = 2.5 \cdot 10^{-8} \text{ c/cm}^2$,在正常适用于高分辨率电子显微镜的图象衬比度小的情况下($q_0/q_1 < 10\%$),该值肯定会被超越。甚至于有这样的印象,即炭膜粒化作用的衍射图于冷冻效应之上产生,其时,在同样负载情况下出现的变形一空间频率的统计学分布,受到图象电荷密度微小变化的影响。在衍射图中观察到的散射背景可以证明,这种情况发生并不完全。我们认为,从谐振现象看来,在我们实验中仅对 $50 \mu m$ 周期长度发现的记忆效应是与冷冻效应有联系的。对于按膜层厚度优选出的空间频率来说,较小的剩余电荷是可以成为有效的完全显影的动力。为什么在 Staybelit 薄膜中随着等待时间的增长,这种现象越来越明显呢?目前我们还不能解释清楚。

出于多种原因,快速电子对于热塑膜是不利的。首先,它的作用距离大于膜层厚度,这样,电荷不是降至表面而是扩展到整个膜厚。因此,仅有一部分静电力对变形产生作用。我们认为,这里应当找出原因,追研为什么用 40 KV 的电子这样超高的电荷密度

还达不到相位点阵一衍射效率的理论极限。

另外,很有可能通过快速电子,而使材料交织。可以肯定,在用原级电子能量进行的实验中,记忆效应一部分是以这种效应为基础的,信道板克服了种种此类困难。落于膜层的电子能量 U_k ,在这时可以选择小些,务使只在表面充电并排除塑料的交织。然而 U_k 值仍须大于所施加电荷密度 q 的滞后电位 $U_R = \frac{q \cdot d}{\epsilon\epsilon_0}$ 。对于 $U_k = 4 \text{ KV}$ 而言,这肯定能予以满足。

信道板的叠加栅网只是一个无关紧要的干扰。目前,我们的信道板仍具有 $40 \mu m$ 信道,而市场可购得的小于 $20 \mu m$ 。再就分辨率来说,按图10的测试星点图它优于 15 Lp/mm ,证明它足以够用的。然而,缺点是次级电子发射的量子效率在 100 KV 电子的输入端未佳于 $\kappa = 0.1$ [14]。另外,保证平均达到必要电流密度放大为 $\kappa \cdot V \approx 10^4$ 的一种高的次级电子放大,不能克服以下困难,即除了不可避免的原级电子噪声外,图象还由于转换过程中附加的噪声值而变坏。从这一点考虑,照像干板以 $\kappa \approx 0.5$ 为宜[15]。于是有一部分又重新形成原来的情况,即用转换器所得的衍射图比用照像乾板所得的衍射图噪音较大。

按照上述考虑,主要是热塑膜的厚度影响到转换器的功能。由膜厚所确定的膜层传递周期,其位置应当适应于信道板的传递函数,并具有对其自身结构足够的可靠距离。在所进行的实验中,未能满足这些要求。可以期待,而且将来也应当证实, $20 \mu m$ 的信道板和 $40 \mu m$ 厚度的热塑膜将获得进一步明显的进展。

在实验中,膜层的加热是通过较大数量 100 ms 脉冲而实现的,加热脉冲使温度阶梯式的升高,因此,也就能较好地测出变形。在实际应用中通过准确剂量的单个脉冲而显影和擦除。很明显,基于设备方面的原因,面一功率密度,限制在 20 W/cm^2 ,在这种情况下,脉冲持续时间为 0.5 秒或 2 秒就够

了。显影擦除脉冲的一种时间上较宽的集中估计会降低所要求的总能量，因为，根据我们的计算，由于热传导至玻璃基板，膜层的温度—时间常数，总计仅约 $100ms$ 。热塑膜的温度后继基底的温度仅相差几个 ms 。因此，快速能量转换，可能加速流体动力学和电学过程。少量转换能使膜层在较短的时间里通至其起始温度，不仅提高了在快速重复能力方面的要求，而且也提高了显影与擦除过程再现能力方面的要求。在实验中施行的逐级显影的情况下，自然，单脉冲显影所必要的能量的倍数将改变，冷却的时间共计几分钟；以外，总的显影与擦除能量与脉冲的间隔以及起始温度有关。

尽管在解释原理研究方面有很多困难，在设备方面技术不够完善，电子显微镜上的实验表明，可以在转换膜上制成能用的衍射图。甚至有效地证实：通过适量加热，能够突出较高的空间频率。由此而产生的传递特性曲线的高度适应性将克服由于碳的原子散射幅度所引起的衍射图中过度的径向强度下降，并且也尽可能地排除信道板传递特性的影响。应当注意，如果被调制在百分之几的小值衍射效率时，那么，宽带的空间频率分布只是无高次谐波地再现。这里表现出相位点阵的一个原则性缺陷，然而，允许得到比振幅点阵高得多的衍射效率，但遗憾的是衍射级较高，在以点阵式电荷密度分布进行的原理性实验中，也观察到许多衍射级，其中一部分也可以当作已曝光矩形点阵的高次谐波。

热塑转换器是否有可能成为一种实用图象读出，以使用相干光学方法来进行定量的进一步处理呢？这个问题经过实验尚未清楚。明显的非线性、空间频率的相互影响，特别是灵敏度对电荷密度的常数部分的依赖关系等问题还悬而未决。在有限的条件下，就变形和空间频率范围，线性能否充分地得

到保证，这个问题有待进一步在实验和理论上澄清。如果目前有一种可重现的传递函数，那么在有关的空间滤频过程中，即可考虑如上的问题。

进一步的工作

为了使转换器的原理能够作为辅助手段而用于电子显微镜，有必要在几个问题上加以改善。

最重要的是，擦除过程之后的冷却时间要减少，这样，在“显影”与“擦除”两种基本功能的相应的自动化过程中，每段时间里转换器都将随时可用。通过缩短加热脉冲，改善导热性能，也可通过过渡为反射型作业（热塑膜置于加热反射镜上）等手段达到此目的。通过市售的信道板25毫米的象场可扩展到直径为40—75毫米，当然，对于导热性的要求是难以达到的。如前所述，今后20微米以下的信道直径和较厚的热塑膜可能对转换器的传递性能有利。

为了观察衍射图，估计有可能用一种简单的电传真传递，这时，仪器可如下读数，即交替地用信道板放大观察于一块荧光屏上的电子显微镜图象，或在激光光程中所得到的、热塑存储器图象的再现。采用这种方法，也许要联用一套图象放大装置[16]。

在确定这种装置的方案时，可以考虑一种电子光学转换，即把来自信道板的电子图象，转换到安置于较大距离的转换膜层上。如果激光光束能够照到其摄影位置的膜层上，那么，据说可以在持续加热的膜层上达到连续的图象转换，它以一定的惰性跟随电流密度分布而变化[17]。

译自 “Optik” 45(1976)No.3

S. 231—247

[大舟译 严国荣校]