



光导热塑片全息照相*

光塑全息小组

(中国科学院物理研究所、化学研究所)

一、前言

1948年,加柏(Gabor)为了改进电子显微镜的分辨率,发明了全息照相原理。1962年,利思(Leith)和乌帕特尼克斯(Upatnieks)借用无线电通讯中的载频调制概念,提出离轴的全息照相方法。此后,全息术发展非常迅速。

全息术的二个基本条件是,一个相干性较好的光源,和一种分辨率足够高的感光材料。前者由激光器提供,后者一般采用超微粒银盐干板。随着全息术的飞速发展,对于记录材料提出了越来越高的要求;例如:高灵敏度,实时显像,低噪音,立体储存,可重复使用等。因此,除银盐干板外,人们为了获得一种较理想的全息记录材料,目前正在加紧研究非银盐体系感光材料。

光导热塑片(简称光塑片)是非银盐感光材料的一种,它是从热塑料记录的基础上发展起来的。1963年前后开始报导光塑照相,1966年^[1]首次报导用光塑片实现全息照相,现在正处于研制阶段^[2,3]。

本文首先试图对光塑全息照相过程进行一些数学分析,指出为获得最大静电反差所需要的最佳曝光量,以及光导层与热塑层的最佳电位匹配;然后描述光塑全息照相实验及其结果;最后对光塑片的性能、用途进行一些讨论。

二、原理

1. 全息记录概念

全息照相所要记录的是物体光波本身。我们用的一般感光材料,它们仅对光的能量发生反应,所以只能记录光波的振幅,而不能记录光波的位相。为了能够记录光波的全部信息——振幅与位相,还必须采用一束与物体光波相干的参考光波。假设在 (x, y) 平面上,物体光波为:

$$O(x, y) = a(x, y)\exp[i\theta(x, y)],$$

它沿 z 轴传播;参考光波为

$$R(x, y) = A\exp[-i2\pi\alpha y],$$

其中

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\lambda},$$

φ 是参考光束的入射角。则在 (x, y) 平面上的光强分布为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |O(x, y) + R(x, y)|^2 \\ &= A^2 + a^2(x, y) \\ &\quad + 2Aa(x, y)\cos[2\pi\alpha y + \theta(x, y)]. \end{aligned} \quad (1)$$

由此可见,处在 (x, y) 平面上的记录材料,所记录的是一组余弦调制的干涉条纹。物体光波的振幅,调制这组条纹的强度,它的位相,调制这组条纹的间距。所以,物体光波的全部信息都储存在这组条纹中。将记录这组条纹的材料经过化学或物理方法的适当处理,就获得一张全息图。从(1)式可见,当用平面光波照明这张全息图时,物体光波就再现出来了。

2. 光塑照相一般原理

全息照相用的光塑片一般是四层结构形式的(见图(1)),整个片子由四层材料组成:透明的片基,透明导电层,光导体及热塑料。

图1是照相过程的示意图:

第一步,片子在黑暗中充电敏化。由于光导体在黑暗中可以近似地看作绝缘体,所以用电晕放电法向热塑层表面充电时,其电压分别降在热塑层与光导层。

第二步,曝光录像。光导体在光束照射下变为导体,引起放电,光强大的区域,放电快,片上的电压下降多,光强小的区域,放电慢,片上的电压下降少。曝光的结果,在片子上形成了一个电位潜像,或者说在光导层上形成了一个电荷潜像。

第三步,再充电。用电晕放电法再一次向片子充电后,片子的表面电位又趋向均匀分布,电位潜像消失了,但在热塑层上却产生了一个电荷潜像。再充电的过程,实际上是把光导层上的电荷潜像转移到热塑层上。

第四步,加热显影。使用热传导,热辐射,或者利用片子的导电层,通电加热等方法,将片子加热到热塑料软化点。这时,在静电力的作用下,热塑层开始形

* 1973年5月9日收到。

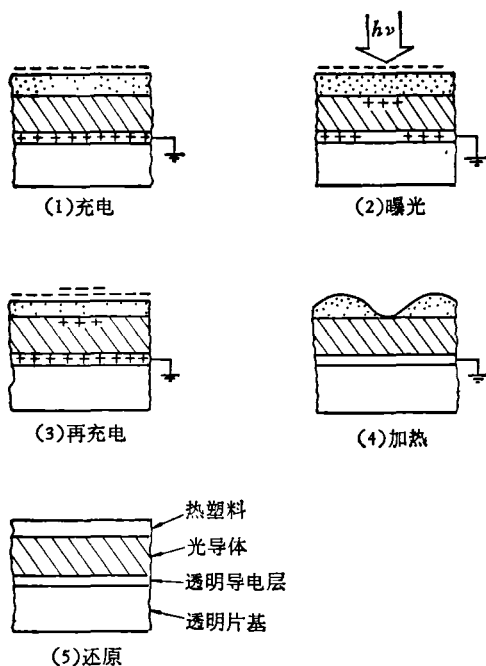


图1 照相过程示意图

变。表面电荷密度大的区域静电力大，热塑层下陷，因为热塑料的体积不可压缩，所以，电荷密度小的区域热塑料隆起。这样，热塑层表面的电荷潜像就转变为热塑层的浮雕像。当热塑料形变后，突然切断热源，片子急剧冷却，浮雕像就冻结下来了。从加热显影到冷却固像，片子的处理时间很短，通常是一秒左右。

第五步，消像还原。把片子加热到热塑料软化点以上，此时，由于热塑料的热导性，片子的表面电荷全部消失，与此同时，在表面张力的作用下，热塑层恢复到原来的平整光滑状态，便可再次使用。

光塑片最终是靠热塑料的形变记录影像的，因此这是一种位相材料。光透过片子，或者从片子表面反射，仅仅改变光波的位相。这在一般像的显示中是个不利的因素，必须采用阴影仪之类的光学系统才能清晰显示影像。但是，对于全息照像来说，这却是个优点，位相全息图的衍射效率高，而离轴全息图的重现像与零级光本来是分开的，无需采用额外的装置。

前面提到的浮雕像，是一种条纹形变^[4]。这种形变，只有当热塑层表面电荷密度空间分布符合热塑层的形变规律时，才容易发生，否则将出现另一种形变——霜冻形变^[3,6]。所谓霜冻形变是因为外观类似于冬天玻璃窗上结的霜一样而命名的。文献[4, 7, 8]研究了热塑层的形变规律，指出，对于霜冻形变，存在某一临界电荷密度，当表面电荷密度超过临界值时，形变才能发生；对于条纹形变，热塑层存在一个准共振频率，当表面电荷密度空间分布的频率与准共振频率相近时，形变才容易发生。这个准共振频率的周期约为

热塑层厚度的二倍。光塑全息照相中，由于记录的是干涉条纹，所以热塑层的形变属于后一种。因此必须注意参考光束倾角的选择，使载频符合热塑层的准共振频率。

3. 照相过程分析

对于克分子比为1:1的聚乙烯吡唑与2、4、7-三硝基-9-芴酮的络合物，已有文章^[9,10]指出，这种有机光导体的表面电位的光衰减曲线是指数型的。在此基础上，我们对于用这种光导体构成的光塑全息片的照相过程进行数学分析。

照相过程的第一步，用电晕放电法给片子充电，热塑层与光导层上的电压比同它们的电容量成反比，即

$$C_T/C_P = V_P/V_T \quad (2)$$

其中 C_T 、 C_P 、 V_T 、 V_P 分别是热塑层与光导层的电容与电压。

第二步是曝光录像。假设参考光束强度为 I_R ，物体光束与参考光束的强度比为 γ ，那么在全息图平面上干涉条纹的强度为

$$I = \begin{cases} I_R(1 + \sqrt{\gamma})^2 & (\text{极大}), \\ I_R(1 - \sqrt{\gamma})^2 & (\text{极小}). \end{cases} \quad (3)$$

片子曝光 t 时间后，在光导层上得到与干涉条纹相应的最大静电反差为

$$\Delta V_P = (V_P - V_R) \{ \exp[-I_R(1 - \sqrt{\gamma})^2 t/E_0] - \exp[-I_R(1 + \sqrt{\gamma})^2 t/E_0] \}, \quad (4)$$

这里 V_R 是光导体的剩余电位， E_0 是与片子的光导层有关的常数。

第三步是再充电。通过电晕放电向片子充电的过程可以看作是电容器的充电过程，被充电的电容是光导层与热塑层的总电容 C_0 ，充电电阻是空气的放电电阻 R_0 ，充电的效果是填平由曝光造成的静电反差 ΔV_P 。因此，在 t' 再充电时间内，片子上附加的电位为

$$\Delta V_R = -\Delta V_P \left[1 - \exp\left(\frac{-t'}{R_0 C_0}\right) \right]. \quad (5)$$

大多数情况下 $R_0 C_0 \ll 1$ 秒。当 t' 足够大（数秒以上）时，

$$\Delta V_R \approx -\Delta V_P, \quad (6)$$

因为光导层与热塑层是按它们的电容比例进行电压分配的，所以热塑层上得到的静电反差是

$$\begin{aligned} \Delta V_T &= \Delta V_R \frac{C_P}{C_T + C_P} \\ &= \frac{C_P}{C_T + C_P} (V_P - V_R) \{ \exp[-I_R(1 + \sqrt{\gamma})^2 t/E_0] \\ &\quad - \exp[-I_R(1 - \sqrt{\gamma})^2 t/E_0] \}. \end{aligned} \quad (7)$$

综上所述，光塑片平时是没有光敏性的；使用时，给片子表面充电，使其敏化；曝光结果只在光导层上造成静电潜像；再充电的过程是把此潜像转移到热塑层

上来。

我们取 $\partial(\Delta V_T)/\partial(I_{Rt})$, 并令其为零, 就可以求得最佳曝光量

$$I_{Rt} = \frac{E_0}{2\sqrt{\gamma}} \ln \frac{1 + \sqrt{\gamma}}{1 - \sqrt{\gamma}} \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式, 得最大静电反差

$$\Delta V_{\max} = \frac{C_P}{C_T + C_P} (V_P - V_R) f(\gamma), \quad (9)$$

其中

$$f(\gamma) = \left(\frac{1 - \sqrt{\gamma}}{1 + \sqrt{\gamma}} \right)^{\frac{(1 + \sqrt{\gamma})^2}{2\sqrt{\gamma}}} - \left(\frac{1 - \sqrt{\gamma}}{1 + \sqrt{\gamma}} \right)^{\frac{(1 - \sqrt{\gamma})^2}{2\sqrt{\gamma}}} \quad (10)$$

利用(2)式, (10)式可改写为

$$\begin{aligned} \Delta V_{\max} &= \frac{V_T}{V_T + V_P} (V_P - V_R) f(\gamma) \\ &= \frac{V_T}{V_0} (V_P - V_R) f(\gamma). \end{aligned} \quad (11)$$

我们取 $\partial(\Delta V)/\partial V_T$, 并令其为零, 就可以求得热塑层与光导层的最佳电位匹配

$$V_T = V_P - V_R$$

再利用(2)式, 上式可表示为二层电容量之间的关系, 即

$$C_P = C_T - \frac{V_R}{V_0} (C_T + C_P). \quad (12)$$

通常情况下, 光导层剩余电位 V_R 远小于片子的表面电位 V_0 , 所以, $C_P \approx C_T$, 把这个结果代入(9)式, 最后我们得到在最佳曝光条件下和热塑层与光导层的最佳匹配条件下, 最大静电反差为

$$\Delta V_{\max} = \frac{1}{4} V_0 f(\gamma). \quad (13)$$

三、实验装置与实验结果

为了正确地选择参考束的倾角和掌握曝光量, 我们首先必须测量实验所用的光塑片的准共振频率、分辨率和光敏性。对于热塑层厚度为 1.5 微米的片子,

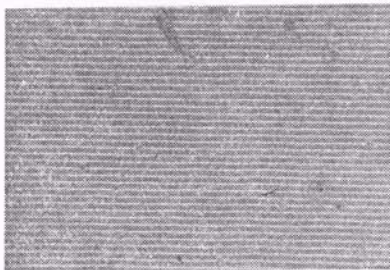


图2 放大 252 倍相差显微镜拍摄的光塑片照片, 干涉条纹 250 线/毫米

用双光束干涉法测得的准共振频率为 300 线/毫米, 分辨率为 700 线/毫米, 图 2 是这种片子 250 线/毫米的放大 252 倍的照片。对此测得的一级衍射效率是 22%, 二级衍射效率是 8%。对于片子光敏性的测试, 我们采用表面电位计测量片子的表面电位, 用全息照像的参考束曝光, 测得表面电位的半衰期为 5 秒。从表面电位-曝光量之间的指数型曲线知道, E_0 是表面电位下降到 $1/e$ 时的曝光量。因此, 从半衰期的测量不难求得常数 E_0 的数值, 对于我们实验用的片子, $E_0 \approx 7I_R$ 。最后, 从(8)式我们就可以求得最佳曝光时间。实验结果表明, 这样求得的曝光时间效果良好。

全息照相的基本实验装置表示在图 3 中。采用国产 HN-1 型氦氖激光器, TEM_{00} 模, 输出约 0.3 毫瓦, 波长 6328 Å, 相干长度 3 米以上。激光束经过 32 倍的显微镜镜头扩大为直径 6 厘米的光柱。所用光塑片是四层结构式的, 片基是厚度 80 微米的涤纶薄膜; 碘化亚铜作为透明导电层; 采用的光导体是克分子比为 1:1 的聚乙烯吡啶与 2, 4, 7-三硝基-9-芴酮的络合物, 涂层厚度 5 微米; 热塑层采用甘油松香脂, 厚度 1.5 微米。照相时, 塑料面背向光束, 以便电晕充电。电晕放电器的直流高压电源在 6000 伏以上, 放电钨丝的直径为 0.03 毫米; 为了控制片子的表面电位, 采用 50 目的金属网作为控制栅, 其电源是 500 伏到 2000 伏连续可调的稳压电源; 电晕放电电源与控制栅电源可同时改变充电极性。被摄物体是前后间距 8 厘米的二个平面目标, 光束经过毛玻璃对目标漫射照明。

照相时, 电晕充电器的高压电源调节到 -6000 伏特, 控制电源调节到 -2000 伏特, 片子充负电荷。参考光束与物体光束的平均夹角为 12° , 二者的强度比为 4:1, 形成的空间载频与片子的准共振频率相符。电晕充电 15 秒后, 打开光闸曝光, 曝光时间为 7 秒, 在整个曝光期间并不停止充电, 以便能够形成更大的静电反差, 曝光后再持续充电一、二秒。然后将片子用红外辐射方法加热处理, 从显影到定影整个过程在几秒钟时间内完成。

图 4 是放大 252 倍的光塑全息图与它的重现像。

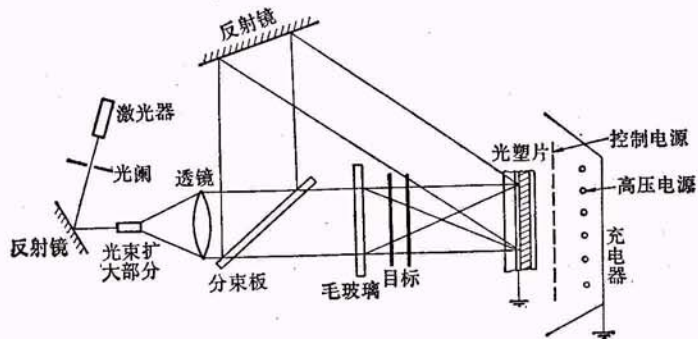


图3 用光塑片做记录材料的全息照相基本装置

四、讨 论

光塑片从曝光摄像到加热显像整个过程所用的时间极短,仅几秒钟,因此可以认为是一种实时感光记录材料。目前,绝大部分实时全息记录材料的光敏度均比较低,如光色材料、光聚合物等,唯独光塑材料可与银盐媲美。从实验结果来看,对于波长为 6328 \AA 的红光,它比国产银盐全息干板的光敏度至少高一个数量级。顺便指出,这种光塑片是全色的,并且对于蓝、绿光,光敏度还要高些。

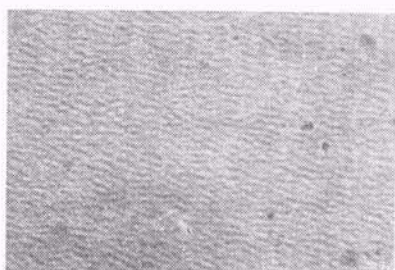
我们只要把热塑料层的厚度降低到1微米以下,例如0.2微米,那么,它的分辨率极限可达4000线/毫米,这可以同任何银盐全息片的分辨率相比。然而必须指出,由于片子的空间频率响应受到带宽的限制,分辨率的上升必然引起低频阈同时上升。光塑片的这种带宽限制的性质,使得全息照相中被摄物体的大小受到限制,但也带来了好处,即能够自动滤除照相过程中产生的低频分量和周围的背景光。所以,它能够拍摄发光物体的全息图。前面已经指出,这是一种位相型的全息图,由于非正弦形变,一级衍射效率最高可达41%。

这种片子的缺点是:照相装置比较复杂;涂层、充电、加热等的均匀性不易控制;在温度较高的环境下,像自动退化;存在无规的霜冻噪音。此外,如果环境不清洁,尘土噪音十分明显;以及,片子重复使用率也是有限的。

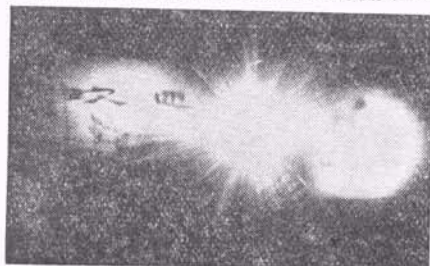
由于光塑材料具有上述特点,所以它是目前较好的一种全息记录材料,特别在要求实时处理、位置不动的全息照相中,更显得重要。例如,实时的全息干涉计,及光学信息处理中制造位置不动的复数空间滤波片等。

参 考 文 献

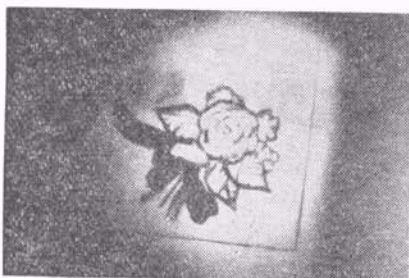
- [1] Urbach, J. C. and Meier, R. W., *Appl. Opt.*, 5 (1966), 666.
- [2] Lin, L. H. and Beauchamp, H. L., *Appl. Opt.*, 9 (1970), 2088.
- [3] Bellamy, J. C., etc. *Appl. Opt.*, 10 (1971), 1458.
- [4] Urbach, J. C., *Photo. Sci. Eng.*, 10 (1966), 287.
- [5] Gundlach, R. W. and Claus, C. J., *Photo. Sci. Eng.*, 7 (1963), 14.
- [6] William, A., etc. *Photo. Sci. Eng.*, 8 (1964), 206.
- [7] Cressman, P. J., *J. Appl. Phys.*, 34 (1963), 2327.
- [8] Budd, H. F., *J. Appl. Phys.*, 36 (1965), 1613.
- [9] Queener, C. A., *Photo. Sci. Eng.*, 15 (1971), 423.
- [10] Zweig, G., *Photo. Sci. Eng.*, 16 (1972), 359.



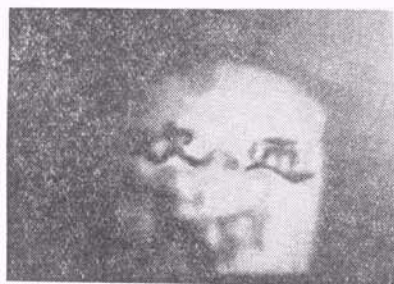
(1) 光塑全息图,用相差显微镜拍摄后,放大252倍



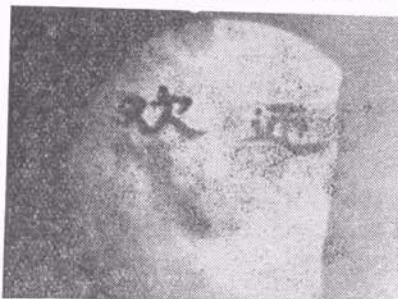
(2) 全息图重现全景



(3) 感光片在“花”的像平面上拍摄的图样



(4) 感光片在“花”与“字”的像平面中间拍摄的图样



(5) 感光片在“字”的像平面上拍摄的图样

图4 全息图与重现像