

# 光导热塑料及其在全息技术中的应用

光导热塑料全息小组

(中国科学院物理研究所)

## 一、前言

作为一种崭新的成像技术,全息照相术<sup>[1,2]</sup>不仅以其能获得物体的三维再现象引人注目,而且已经成为激光应用的一个重要领域,与科学研究、新技术发展和工业生产等许多方面发生联系。目前,全息照相用的主要记录材料是银盐底片。但是从操作、使用方面来看,银盐底片存在着许多固有的弱点,给全息技术推广应用带来了很大困难。为此开展了多种非银盐记录材料的研究。例如掺 Fe 铈酸锂、重铬酸明胶、硫系玻璃半导体、光色晶体及光导热塑料等<sup>[3-6]</sup>。对新的记录材料的要求是:应该有理想的感光灵敏度、分辨率、衍射效率;实时、原位显影;摆脱暗室操作条件及其它适合于使用目的的特殊要求,如能多次重复使用等。光导热塑料近年来取得的新进展,在一定程度上弥补了银盐底片的不足,适合于主要的全息技术应用对记录材料的要求,为全息技术推广使用开辟了新的途径<sup>[7]</sup>。1976年8月在以色列召开的“全息及信息处理应用国际会议”,以及1977年8月在日本召开的“国际照相科学与工程会议”等会议上,都有有关工作的报告。

和普通银盐底片相比,光导热塑料有下面几个主要的特点:(1)实时、原位显影。它不需要化学药液(显影、定影液)处理,可以在原位用电加热显影,而且几乎是瞬时完成的。(2)重复使用。记录在热塑料上的信息可以方便地擦除,并反复多次地使用。(3)不需暗室。采用适当录相技术,就可以在通常照明条件下(60勒克斯)录制全息图,而不象银盐底片那样必须在暗

室条件下进行全息照相。(4)衍射效率高。光导热塑料全息图属于薄位相型全息图,衍射效率可达30%。光导热塑料的主要缺点是空间频率响应带宽的限制,使被摄物体的大小受到限制。近年来对材料及录相技术的改进,使带宽已提高到700线/mm,基本上能够满足通常记录物体的要求。另一个缺点是,如果录相条件控制得不当,全息图的噪音较大。此外需要一套充电、加热控制设备。但是综合全面情况来看,光导热塑料仍被认为是目前非银盐体系中最有希望的全息记录材料。

## 二、结构、材料及简单工作原理

热塑料以其表面变形记录全息干涉条纹。热塑料本身不具有光敏性,使用时需与光导体结合组成迭层结构。典型结构见图1。

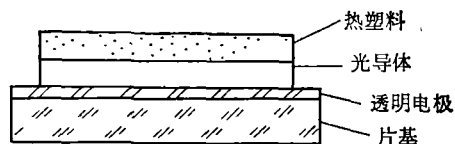


图1 光导热塑料的典型结构

片基是玻璃,要求有较好的光学质量。片基的一面涂有一层透明电极。电极有两个作用,一是在显影时利用透明电极的欧姆电阻通以电流脉冲作为面加热器;二是在充电时接地。光导体是有机材料聚乙烯咔唑(PVK),增感剂用2·4·7-三硝基芴酮(TNF)。光谱响应接近于全色,光谱吸收特性如图2所示。热塑料是氢化松香甘油酯或者其它合适的可塑性材料。

光导热塑料录象是一种静电照相过程,下

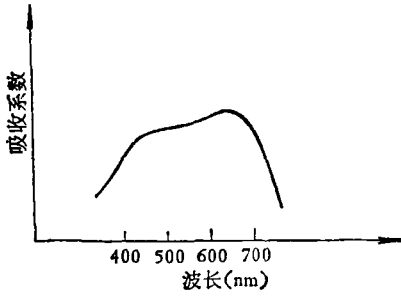


图2 光谱吸收曲线

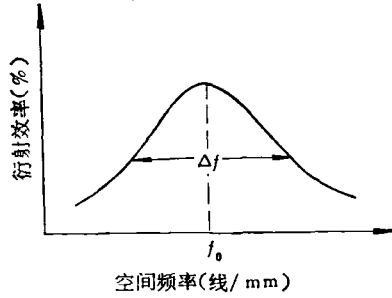


图4 热塑料频率响应特性曲线

面我们对录象过程作一个简单说明。

(1) 第一步是充电利用电晕充电器在光导热塑料表面充上一层均匀电荷(图3)。

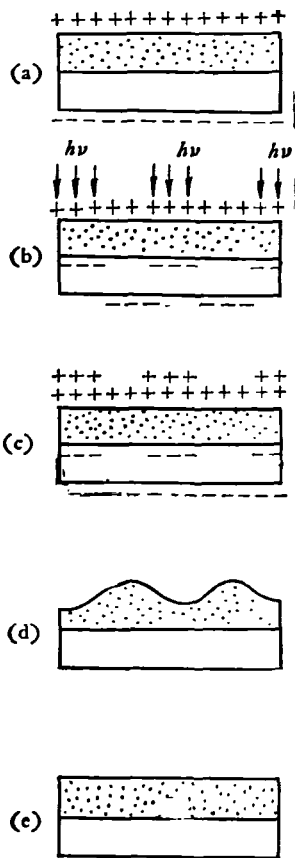


图3 顺序法录相过程

(a) 充电; (b) 曝光; (c) 再充电;  
(d) 显影; (e) 消象

(2) 充电后光导体对光敏感可以开始曝光。在光照区域,光导体电阻下降,电荷部分或全部释放到光导体和热塑料界面,但热塑料表

面电荷密度不变。

(3) 曝光后继续用电晕充电器充电,使光导热塑料恢复到均匀电位。刚才光照区域需要补充电荷,这样对应于光照部分热塑料表面电荷密度将大于其它部分。静电力分布亦然。

(4) 加热热塑料至软化温度,热塑料在静电力作用下变形,冷却后信息以“浮雕”形式冻结在热塑料表面。

(5) 如记录的信息不要保存,就再加热热塑料至更高温度,在表面张力作用下,表面恢复平滑,所录象消失。冷却后材料可继续使用。

上述充电、曝光、再充电、显影等步骤可以依次顺序进行,称为“顺序录相法”。也可以同时进行,称为“同时法”<sup>[4]</sup>。在实验中,我们采用在加热热塑料至软化温度后或在加热过程中同时充电、曝光的方法进行记录。这种方法容易在热塑料表面得到较大的电荷调制,全息图衍射效率高,重现象质量好,并能获得较大的记录带宽。

所谓“带宽”,是指光导热塑料能够有效记录的空间频率范围。这是光导热塑料和底片之间一个比较大的差别。底片分辨率取决于卤化银颗粒的细度,在其截止频率之下的信号都能记录。热塑料则象石英晶片一样对于接近其共振频率的信号容易响应,远离其共振频率的信号响应渐差。其频率响应特性如图4所示。中心频率 $f_0$ 与热塑料厚度 $d$ 有关。经验值为 $1/f_0 = \lambda \cong \frac{4}{3} \sim 2d$ 。带宽则与录象方法有关。

### 三、光导热塑料感光特性

熟悉使用银盐底片的人都知道使用前需要研究一下它的 H-D 曲线, 以选择合适的曝光、显影条件。光导热塑料作为一种记录材料与银盐底片不同, 它的录象过程主要是物理过程<sup>[8]</sup>。由于变化比较复杂, 参数比较多, 目前还没有比较完整的理论和分析, 特别是对于同时录象方法。作为参考, 下面我们用串联电容模型对顺序录象方法的录象过程进行分析。

在讨论之前, 我们先了解一下关于热塑料的形变。我们经常遇到的有两种热塑料表面形变。一种是在热塑料表面均匀充电至一定值之后, 加热热塑料就会在其表面形成类似霜一般的形变称为“无规霜变”。“霜”颗粒无规随机排列, 大小与热塑料厚度有关, 霜层的厚度与表面电荷密度有关, 见图 5。另一种是热塑料表面电荷分布受到某种外来调制, 例如前面所讨论的依照全息图干涉条纹分布形成全息图。尤其当干涉条纹空间频率接近热塑料共振频率时, 很容易形成这种条纹形变。形变的深度取决于表面电荷密度, 并决定全息图的衍射效率。图 6 是两束平面波干涉条纹在热塑料表面形成的形变的放大照片。

在一定的条件下, 两种形变都可能发生, 彼此互相抑制。“无规霜变”的出现在全息图重现时形成讨厌的噪音, 所以实验很重要的一个方面就是设法抑制“无规霜变”。实验还指出, 当热塑料表面电荷密度小于某个阈值时, 热塑料

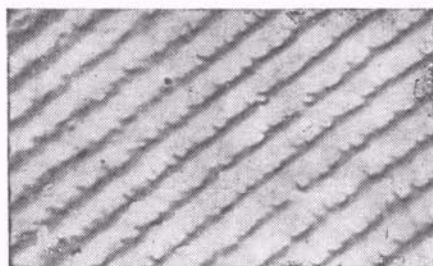


图 6 热塑料条纹形变的放大照片

加热后并不发生形变。在阈值之上, 表面电荷密度增大, 形变也随之增大。当表面电荷超过某个值之后, 形变不再增加, 此值称为饱和电荷密度, 见图 7。

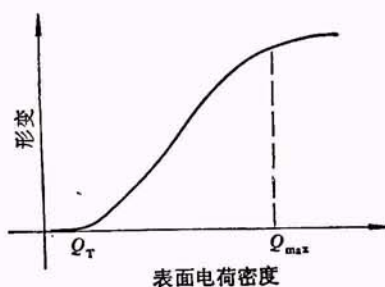


图 7 表面电荷密度-形变关系曲线

下面, 用串联电容模型讨论顺序法录象过程中热塑料及光导体电荷分布, 见图 8。

(1) 第一步, 充电至初始电位  $V_0$ , 据电容充电公式, 有

$$V_0 = Q_0 \frac{1}{C} = Q_0 \left( \frac{1}{C_T} + \frac{1}{C_P} \right),$$

其中热塑料上电位降为  $Q_0 \frac{1}{C_T}$ ; 光导体上电位降为  $Q_0 \frac{1}{C_P}$ 。

(2) 第二步曝光。光导体放电, 电位下降量

$$\Delta V = Q_E \cdot \frac{1}{C_P},$$

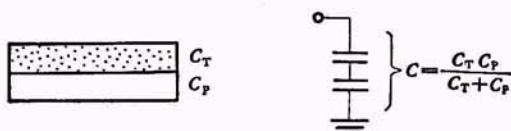


图 8 串联电容模型

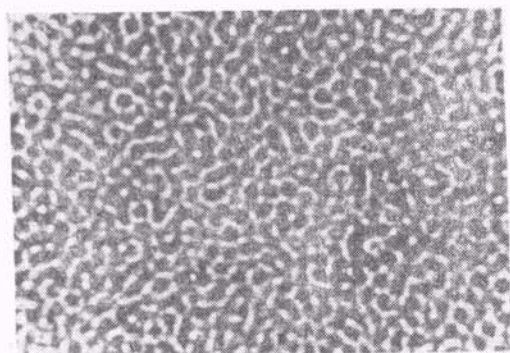


图 5 无规霜变的放大照片

式中  $Q_E$  为光导体放电释放电荷量。剩余电量

$$V_E = V_0 - \Delta V = Q_0 \left( \frac{1}{C_T} + \frac{1}{C_P} \right) - Q_E \frac{1}{C_P}.$$

(3) 第三步再充电至电位  $V_R (V_R \gg V_0)$ , 依靠电位差  $V_R - V_E$  对光导热塑料再充电,

$$V_R - V_E = Q \left( \frac{1}{C_T} + \frac{1}{C_P} \right).$$

$Q$  为再充电电荷, 可推得

$$V_R = (Q + Q_0) \frac{1}{C_T} + (Q + Q_0 - Q_E) \frac{1}{C_P},$$

其中右式第一项为热塑料电位, 第二项为光导体电位。热塑料表面电荷密度为  $Q_R = Q_0 + Q$ , 即初始充电电荷及再充电电荷之和。代入前式即得

$$Q_R = (V_R + V_0 - V_E) / \frac{(C_T + C_P)}{C_T \cdot C_P}, \quad (1)$$

式中除  $V_E$  外, 在顺序法录象条件下都是常数, 而  $V_E$  是指曝光后光导热塑料剩余电位。在任何时候, 两层总电位总是分别由热塑料层电位及光导层电位之和组成:  $V_E = V_T + V_{EP}$ , 仅光导层上的电位是随曝光条件变化的。

用泊松方程讨论曝光后光导体电位变化

$$\frac{d^2 V_{EP}}{dx^2} = -4\pi\rho/\epsilon, \quad (2)$$

边界条件为

(i) 当  $x = 0$ , 光导体与透明电极界面

$$V_{EP(0)} = 0;$$

(ii) 当  $x = d$ , 光导体与热塑料界面:

$$V_{EP(d)} = V_{OP};$$

$V_{OP}$  为初始电位  $V_0$  分配在光导层上的电位,

$$V_{EP} = V_{OP} - \frac{4\pi}{\epsilon} \int_0^d dx \int_0^x \rho(x') dx'. \quad (3)$$

由于曝光光导体产生载流子,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -q\eta I \alpha e^{-\alpha x}, \quad (4)$$

式中  $q$  为电子电荷量,  $\eta$  为量子效率,  $I$  为光强,  $\alpha$  为吸收系数。

假定量子效率和电场成正比,

$$\eta = KE = K \cdot V_{EP}/d,$$

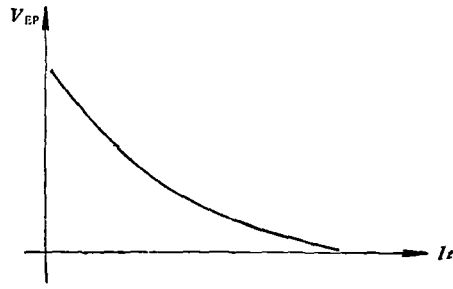


图9 指数型光衰曲线

$$\frac{dV_{EP}}{dt} = \frac{-4\pi}{\epsilon} \int_0^d dx \int_0^x \frac{\partial \rho}{\partial t} dx'. \quad (5)$$

将(4)式代入, 作适当近似, 令  $f(\alpha d) = 1 - \frac{1 - e^{-\alpha d}}{\alpha d}$ ,  $K' = \frac{f(\alpha d) \cdot 4\pi q K}{\epsilon}$ , 则可得

$$V_{EP} = V_{OP} e^{-K' t}. \quad (6)$$

上式表明, 光导体上的电位和曝光量之间关系呈指数衰减曲线(见图9)。光衰曲线在实验上也很容易测得。

再将(6)式代入(1)式, 得

$$Q_R = \frac{V_R + V_0 - V_E}{(C_T + C_P)/C_T \cdot C_P}. \quad (7)$$

我们把光导体、热塑料表面电荷密度随曝光量变化的曲线画到一张图上, 因为这两层总电位(或电荷密度)在再充电之后等于恒定值, 所以这两条曲线呈镜像对称, 见图10。

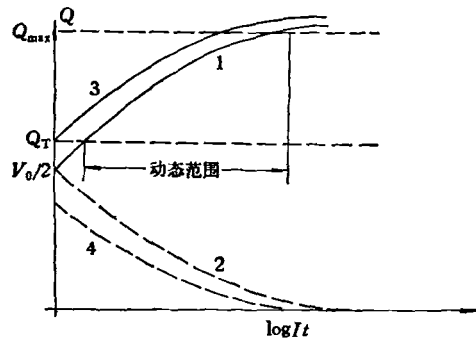


图10 热塑料、光导体-曝光量曲线

- 1, 3 曲线(实线)是热塑料表面电荷密度或电位;
- 2, 4 曲线(虚线)是光导体表面电荷密度或电位;
- 1, 2 两线对应  $V_R = V_0$  的情形;
- 3, 4 两线对应  $V_R > V_0$  的情形

在图10中, 两条平行的虚线表示“阈值”和“饱和”电荷密度。曲线1, 3与这两条虚线相截部分对应横坐标, 指出曝光动态范围, 该段曲线

斜率相应于底片 H-D 曲线的  $\gamma$  值。从这张图上我们可以得出几点:

(1)  $V_R = V_0$  (曲线 1), 初始值  $V_0/2$  愈靠近“阈值”,  $V_T$  材料的感光灵敏度愈高; 若初始值  $V_0/2$  大于  $V_T$ , 则在  $t = 0$ , 即在未曝光情况下热塑料表面电荷密度就超过“阈值”, 显影后形成“无规霜变”, 增加噪音。若初始值低于  $V_T$  太多, 则灵敏度下降, 且有一段弱曝光量信息记录不了。一般宜选择的充电条件使  $V_0/2$  要略低于  $V_T$ 。

(2)  $V_R > V_0$  (曲线 3), 曲线比较平缓,  $\gamma$  值低, 动态范围较大。通过提高  $V_R$ , 使初始值靠近  $V_T$  以保持较高感光灵敏度。

以上讨论是对于顺序法录象作了某些近似的基础上进行的, 主要适用于顺序法。但定性地讲对分析同时法也是有帮助的。同时法因录象过程中热塑料厚度、光导体电场是变量, 所以产生载流子量子效率、载流子迁移率等都是变化的, 各变量互相影响, 使分析和求解比较困难。加上有些实验参数不易测定, 也很难验证分析结果。我们认为可以先在实验上做出光导热塑料的感光特性曲线。

光路设置(见图 11)在全息工作台上, 光源是氦氖激光器, 它的波长为  $6328 \text{ \AA}$ , 功率为  $15 \text{ mW}$ 。

电晕充电器有三个电源: 主电源  $6-10 \text{ kV}$  可调, 接至一组  $0.025 \text{ mm}$  直径的钨丝上, 通过它离化周围空气形成电晕对光导热塑料充电。还有一个  $0-3 \text{ kV}$  可调电源, 接至钨丝前面的

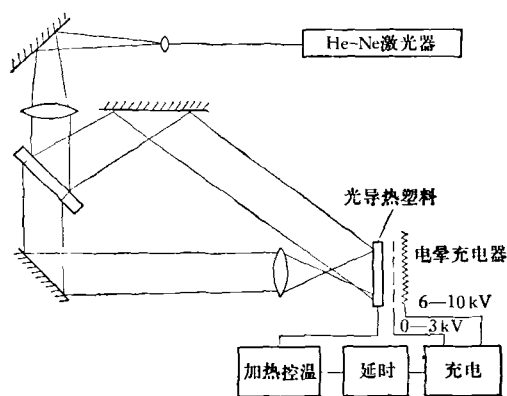


图 11 实验装置

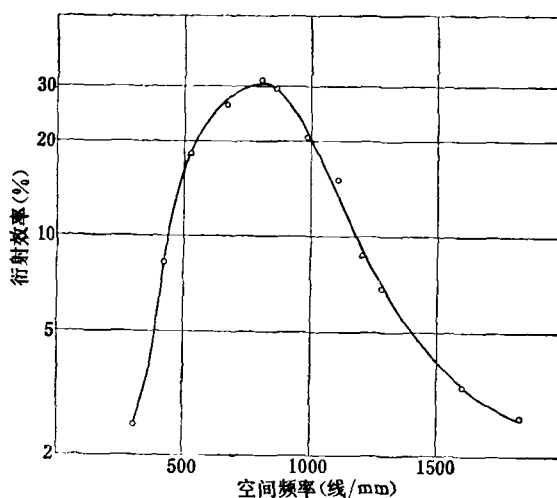


图 12 频率响应特性曲线

铜栅网上。其作用使充电均匀, 调节充电速率, 另外还有时间控制电路来控制充电时间。

加热器由整流及时控器组成。它的加热时间、电流都可调。控温器由热敏电阻探头及控制线路组成, 测量并控制热塑料表面温度。

实验时先加热样品至软化温度, 由控温器给出信号接通电晕充电器开始充电, 同时曝光。到达给定的时间后, 电晕充电器关闭, 录像结束。

我们测定了光导热塑料样品的感光特性参数。衍射效率是记录平面波光栅后测定的。改变两束平面波夹角录制一组不同频率的平面波光栅, 测得衍射效率, 作出空间频率-衍射效率曲线, 便得到频率响应曲线。图 12 是我们和中国科学院化学研究所研制的光导热塑料样品的频率响应特性曲线。中心频率在  $800 \text{ 线/mm}$  附近, 衍射效率为  $30\%$ 。取中心频率两侧衍射效率下降到中心衍射效率  $1/2$  的频率差为带宽, 约为  $600 \text{ 线/mm}$ 。根据录象时光强及曝光时间测得的曝光灵敏度为  $0.2 \mu\text{J/mm}^2$ ; 重复使用次数为  $100$  次, 在  $100$  次以后仍可记录, 质量逐渐下降。

#### 四、在全息技术中的应用

光导热塑料所具有的优点, 使它特别适合

于在全息干涉计量、全息信息贮存及光学信息处理等工作中使用。

### 1. 全息干涉计量术

全息干涉计量术能够对具有任意形状和表面状况的三维表面进行测量。应用这种原理可以进行多种干涉计量。

#### (1) 实时干涉计量(单次曝光干涉计量术)

仅对测量物体做一次全息记录,将处理好的全息图准确复位,用参考波重现。这时再现的物体光波与此时仍由物体发出的光波相干,形成干涉图案用以观测物体的实时变化。这方法的优点在于可实时观测。但使用银盐底片作记录介质时,不易实现全息图的准确复位,使用比较困难。光导热塑料实时、原位显影特点,适合于实时干涉计量工作。

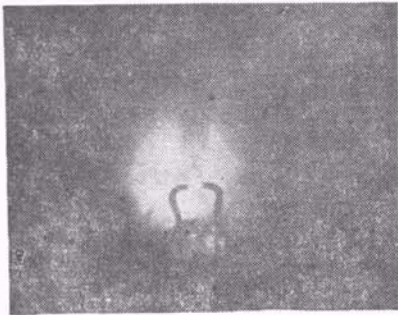


图 13 灯泡内气体实时干涉条纹

在图 13 中,灯丝周围的条纹是实时干涉结果,指示灯泡内气体密度的变化。实验第一步用光导热塑料对未通电的灯泡作一次全息记录,在原位显影,然后用参考光束照明全息图。并接通灯丝电源,便可观测到由于灯泡内气体密度变化形成的干涉条纹。

另外还进行了蜂窝板无损检验的实验,一次检查面积  $300 \times 300\text{mm}^2$ ,时间十几秒钟,用红外灯加热方法实行加载,观测干涉条纹。

#### (2) 二次曝光干涉计量术

二次曝光干涉计量术要求在同一记录材料上制做两张全息图,其中之一记录改变前物体光波,另一个记录改变后的物体光波。作为光导热塑料二次曝光全息干涉计量术应用的一个

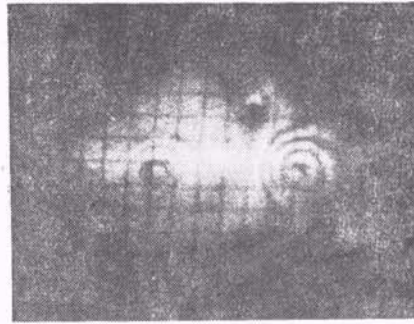


图 14 蜂窝板脱粘缺陷的干涉条纹

实例,我们记录了蜂窝结构板脱粘缺陷的干涉条纹,见图 14。

这种光导热塑料二次曝光技术的一个关键在于正确选择和控制两次曝光时热塑料的温度。当然,理想结果的获得,必须在性能稳定的录象设备上才能做到。利用顺序法和同时法都能记录二次曝光全息图。

#### (3) 时间平均干涉计量术

这个技术是在物体振动过程中记录它的全息图,适于分析稳态振动。迄今为止在为这类分析所设计的方法中是最佳的一种。振动物体的全息图就是物体光波与参考光波形成的随时间变化的干涉条纹(因为物体在振动)的平均记录。作为时间平均干涉计量术的应用实例,

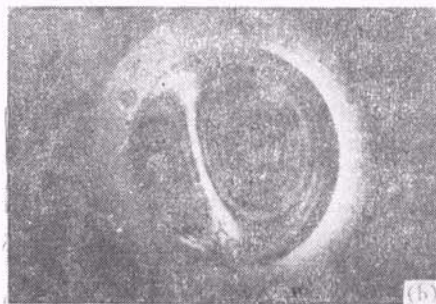
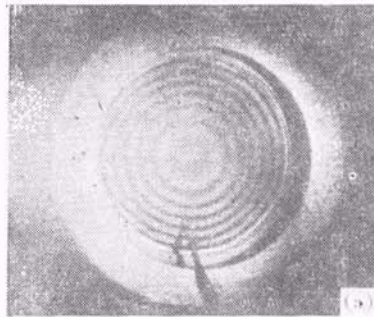


图 15 压电换能器的振动模式

我们用光导热塑料记录了压电换能器的振动模式,见图 15。

全息干涉计量术是全息技术最有成效的应用之一。除以上提到的之外,在检验光学及机械工件面形变化、分析应变、应力、风洞气流等方面,都有很大的潜力。

### 2. 全息信息存贮

全息存贮是光存贮技术中有希望实现高速度、大容量存贮的途径之一。可用于计算机贮存系统及用于图书、资料、文件的存贮等。光导热塑料是一种较理想的可存、取的全息存贮介质<sup>[9]</sup>。图 16 是一页文字的 Fourier 变换全息图的重现象。它在光导热塑料上所占面积直径不到 3mm。

### 3. 光学信息处理

光学信息处理是一种光学模拟运算技术。因为全息术的发展提供了记录和调制光场的有力手段,所以大大促进了光计算技术的发展。全息技术在光学信息处理中应用得十分广泛。尽管光计算本身速度很快,但是输入、输出及调制器的制作等方面遇到的问题使得光计算技术的

应用受到很大的限制。所以,创造一种可反复使用、实时、方便易行的器件是发展光计算技术的一大关键。光导热塑料的实时、原位、可反复使用等特性为光计算技术的发展提供了一种十分有希望的记录材料。我们已将它在有关工作中使用。

## 五、结 束 语

光导热塑料取得的进展为全息技术的推广使用创造了条件。但是作为一种比较理想的全息记录材料,还有一系列工作尚待深入研究。如同时录像法目前应用的比较多,但对同时法的分析和了解却很不深入。此外,获得一张高质量的光导热塑料全息照相的关键是有效地抑制“无规霜变”,牵涉到充电、加热、曝光等条件的控制。我们认为这方面还有很大潜力,改进方法和设备还有许多工作可做。关于材料本身也有待于进一步研究,不断提高。

本工作中所用的实验样品是中国科学院化学研究所、中国科学院物理研究所共同研究提供的。对化学研究所参加工作的人员多年来密切有效的合作表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] D. Gabor, *Nature*, **161** (1948), 777.
- [2] E. N. Leith and J. Upatniks, *J. Opt. Soc. Am.*, **54** (1964), 1295.
- [3] J. C. Urbach and R. W. Meier, *Appl. Opt.*, **5** (1966), 666.
- [4] T. L. Credelle and F. W. Spong, *RCA Review*; **33** (1970), 206.
- [5] W. S. Colburn and E. N. Tompkins, *Appl. Opt.*, **13**(1974), 2934.
- [6] 中国科学院物理研究所,化学研究所光塑全息小组, *物理*, **3-5**(1974), 264.
- [7] H. Steinbechler, J. Smith, *Laser+Elektro Optik*, **3** (1977), 20.
- [8] U. S. Patent, 3485623, Dec. 23, 1969.
- [9] L. H. Lin and M. L. Beachamp, *Appl. Opt.*, **9** (1970), 2088.

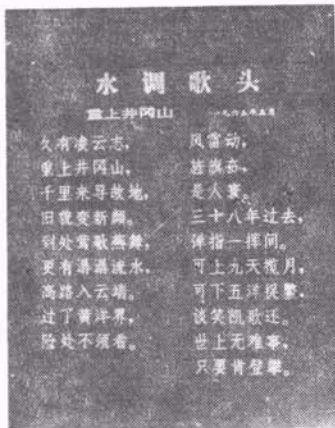


图 16 Fourier 变换全息图重现象

(上接第 370 页)

- [11] 浜川圭弘, *エレクトロニクス*, **19-1**(1974), 48.
- [12] 浜川圭弘, *応用物理*, **44-7**(1975), 713.
- [13] M. Wolf, *J. Vac. Sci. Technol.*, **12-5**(1975), 984.
- [14] F. A. Shirand, *Advanced Energy Conversion*, **6-4**

(1966), 201.

- [15] 马场 泰, *電子材料*, **12-11**(1973), 69.
- [16] 浜川圭弘, *電子材料*, **17-4**(1978), 82.
- [17] 宇佐美晶, *電子材料*, **16-4**(1977), 93.