

# 应用全息法测定感光材料的 模量传递函数

单子娟 李正直

(江苏师范学院)

目前,对感光材料的成象质量的评定采用了模量传递函数(MTF)的方法,它客观地给出了所有空间频率的响应。对于高分辨率的感光材料,例如全息记录介质,分辨率已超过3000线/毫米。因此,较难用通常的正弦标板法和刃边法来测定高分辨率感光材料的MTF。

本文介绍一种利用激光全息方法,通过测定衍射效率来测定感光材料的MTF的实验结果。

## 一、感光材料的模量传递函数

模量传递函数是描述光在感光膜层中的散射现象。事实上,由于光在膜层中的散射,在感光膜层上的象点,将扩散成为一小光斑。该处的曝光量分布可由散布函数来表示。在感光膜层中的有效曝光量分布 $E(x)$ 将是输入曝光量分布 $E_0(x)$ 和感光膜层散布函数 $L(\xi)$ 的卷积:

$$E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x-\xi)L(\xi)d\xi \quad (1)$$

为了方便起见,(1)式中曝光量分布写成一维函数。在这种情况下, $L(\xi)$ 为线散布函数。

MTF应用于线性系统的分析。在线性系统中,如输入是余弦形式,而输出信号亦将是余弦形式。然而,感光底板用于照相记录的过程可以分为两个步骤。第一是曝光形成潜象,由于光在膜层中的散射而形成的曝光

分布称为有效曝光分布。这一过程是线性过程。第二,经显影后,在感光底板上获得密度分布或透射率分布。这一过程是非线性过程。不过,如采用感光底板的密度-曝光量对数曲线( $D-\log E$ 曲线)或振幅透射率-曝光量曲线( $\tau_a-E$ 曲线),把照相记录的密度分布转换成有效曝光量分布,便可应用MTF来表征。

感光膜层的散布函数是对称的。当在感光底板上输入曝光量分布 $E_0(x)$ 是余弦形式,那么,在膜层中获得的有效曝光量分布仍将是余弦形式,而且相移为零,仅仅发生模量变化。如果输入曝光量分布为:

$$E_0(x) = \bar{E}_0[1 + M_0 \cos 2\pi\nu x] \quad (2)$$

上式中 $\bar{E}_0$ 是平均曝光量, $\nu$ 为空间频率, $M_0$ 是输入模量。将(2)式代入(1)式,可得有效曝光量分布为:

$$E(x) = \bar{E}_0 \int_{-\infty}^{\infty} L(\xi)d\xi + \bar{E}_0 M_0 \int_{-\infty}^{\infty} L(\xi) \cos 2\pi\nu(x-\xi)d\xi$$

上式可写成:

$$E(x) = \bar{E}_0 + \bar{E}_0 M_0 \left( \int_{-\infty}^{\infty} L(\xi) \cos 2\pi\nu\xi d\xi \right) \times \cos 2\pi\nu x = \bar{E}_0 [1 + M_0 T(\nu) \cos 2\pi\nu x] \quad (3)$$

上式中 $T(\nu)$ 称为模量传递函数MTF,它等于:

$$T(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} L(\xi) \cos 2\pi\nu\xi d\xi$$

收稿日期:1979年1月15日。

由此可见,感光膜层的MTF就是感光膜层的线散布函数的傅里叶变换。

如令  $M(\nu) \equiv M_0 T(\nu)$ , (3)式可写成:

$$E(x) = \bar{E}_0 [1 + M(\nu) \cos 2\pi\nu x]$$

上式中  $M(\nu)$  称为有效曝光模量。因此,所谓模量传递函数  $T(\nu)$  即是表征有效曝光模量  $M(\nu)$  对输入曝光模量  $M_0$  之比随空间频率  $\nu$  变化的函数。即

$$T(\nu) = M(\nu) / M_0 \quad (4)$$

## 二、MTF 的测定原理

这里采用测定正弦振幅透射光栅的衍射效率来获得底板的模量传递函数 MTF。若参考光束( $r$ )与物光( $0$ )皆是相干的激光平面波,它们的夹角为  $\theta$ , 在它们的空间干涉场内放置感光板。当两光束相对底板法线对称入射,在感光底板平面内干涉场的光强分布为:

$$I = I_r + I_0 + 2\sqrt{I_r I_0} \cos 2\pi\nu x$$

上式中  $I_r, I_0$  分别代表入射在底板上的参考光与物光的光强,  $\nu$  是空间频率, 它等于:

$\nu = 2 \sin \frac{\theta}{2} / \lambda$ 。此时,对底板而言,输入曝光模量  $M_0 = 2\sqrt{I_r I_0} / (I_r + I_0)$ , 显然,此时输入曝光分布为:

$$\begin{aligned} E_0(x) &= (I_r + I_0) \\ &\times \left[ 1 + \frac{2\sqrt{I_r I_0}}{I_r + I_0} \cos 2\pi\nu x \right] t \\ &= \bar{E}_0 [1 + M_0 \cos 2\pi\nu x] \end{aligned} \quad (5)$$

那么,在照相乳剂膜层内的有效曝光量分布  $E(x)$  为:

$$\begin{aligned} E(x) &= \bar{E}_0 [1 + M(\nu) \cos 2\pi\nu x] \\ &= \bar{E}_0 [1 + M_0 T(\nu) \cos 2\pi\nu x] \end{aligned} \quad (6)$$

由于  $\tau_a - E$  曲线为非线性关系,如输入低模量的光信号时,在平均曝光量  $\bar{E}_0$  附近展开,可忽略高阶项(参看图 1.)

$$\begin{aligned} T_a(E) &= \bar{T}_a(\bar{E}_0) \\ &+ \left( \frac{d\tau_a}{dE} \right)_{\bar{E}_0} \bar{E}_0 M_0(\nu) T(\nu) \cos 2\pi\nu x \end{aligned}$$

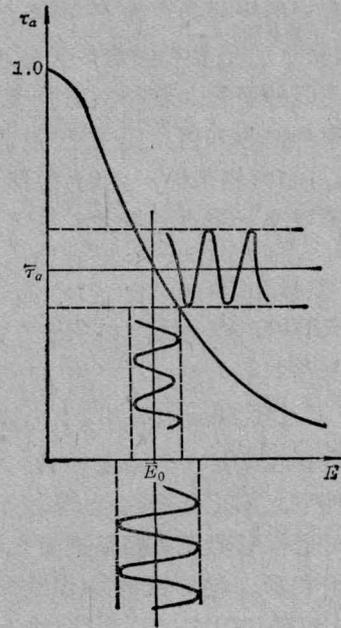


图 1  $\tau_a - E$  曲线

若再用原来的参考激光平面波照射此正弦振幅透射光栅,可得到一阶衍射光强  $I_1$  为:

$$I_1 = I_r \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{d\tau_a}{dE} \right)_{\bar{E}_0} \bar{E}_0 M_0 T(\nu) \right]^2,$$

亦即一阶衍射效率  $\eta = I_1 / I_r$  为:

$$\eta = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{d\tau_a}{dE} \right)_{\bar{E}_0} \bar{E}_0 M_0 T(\nu) \right]^2. \quad (7)$$

如令  $\left( \frac{d\tau_a}{dE} \right)_{\bar{E}_0} = \beta$ , 则(7)式变为:

$$\eta = \left[ \frac{1}{2} \beta \bar{E}_0 M_0 T(\nu) \right]^2 \quad (8)$$

从(8)式可看出,如已知  $\beta, \bar{E}_0, M_0$ , 通过测定不同空间频率  $\nu$  时的衍射效率  $\eta$ , 便可求得 MTF 曲线。(8)式是适用于薄光栅情况,但对于高空间频率振幅光栅,必须作厚光栅来考虑。其衍射效率可由下式表示

$$\begin{aligned} \eta &\approx [\exp(-2a_0 d / \cos \theta_B)] \\ &\times \left[ \frac{\sin^2 \left\{ a_1 \left( \frac{d}{2 \cos \theta_0} \right) \left[ \left( \frac{\pi \alpha}{a_1 \lambda} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \right\}}{\left( \frac{\pi \alpha}{a_1 \lambda} \right)^2 - 1} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

上式中  $d$  是膜层厚度。 $a_0, a_1$  是作正弦变化的振幅吸收系数的平均值和颠值。 $\theta_B$  角是

拍摄时两光束的平分角,  $\theta_0$  是物光的入射角,  $\alpha$  参数是重现光束入射角  $\theta$  与重现照明光波长的线性函数。若拍摄正弦光栅时, 两相干光束为对称入射, 而在测量衍射效率  $\eta$  时, 满足布喇格条件, 此时  $\theta_B$  即为布喇格角。衍射效率  $\eta$  将达到极大, 并可用下式表示:

$$\eta \approx \exp\left(-2\alpha_0 \frac{d}{\cos \theta_B}\right) \sin^2 h^2 \times \left[ a_1 \frac{d}{2 \cos \theta_B} \right] \quad (10)$$

下面叙述在满足布喇格条件时, 在我们的实验条件下, 厚正弦振幅光栅的衍射效率  $\eta$  公式可近似用薄正弦振幅透射光栅的衍射效率  $\eta$  来表示。推导过程中, 我们采用  $\tau_a-E$  曲线, 可使(10)式过渡到(8)式。

由感光底板的光密度  $D$  的定义, 可看出  $D$  与光强度透射率, 或与振幅吸收系数  $a$  及膜层厚度  $d$  的关系为:

$$D = -\log \tau = 2ad \log e = 0.8686ad \quad (11)$$

因为重现时是在布喇格角条件入射, 光经过膜层的距离为  $d/\cos \theta_B$ 。那么, 此时(11)式变为:

$$D = 0.8686ad / \cos \theta_B \quad (12)$$

那么, 衍射效率  $\eta$  用光密度来表示:

$$\eta = e^{-2.3D_0} \sin^2 h^2 [0.575D_1] \quad (13)$$

因光密度  $D$  亦作正弦分布, 可由下式表示:

$$D = D_0 + D_1 \cos 2\pi\nu x \quad (14)$$

将(13)式展开, 得到:

$$\eta = e^{-2.3D_0} [0.575D_1 + 0.032D_1^2 + \dots]^2 = e^{-2.3D_0} [0.33D_1^2 + 0.037D_1^4 + \dots] \quad (15)$$

由于我们测量 MTF 时, 均在同一光密度下进行。在我们实验条件下, 相应于  $D_0 \sim 0.6 \sim 0.7$  时,  $\eta$  达到极大值。同时, 拍摄时两光束光强比为 1:7, 此时  $D_1$  很小, 因此可把(15)式中的第二项忽略掉, 引进的误差不大, (15)式将过渡到

$$\eta = 0.33e^{-2.3D_0} D_1^2 \quad (16)$$

因为光密度  $D$  的变化是由有效曝光量  $E$  的

变化所引起的。由(3)式便可得到光密度  $D$  与有效曝光量  $E$  的关系为:

$$D = gE + C = g\bar{E}_0 [1 + M_0 T(\nu) \cos 2\pi\nu x] + C \quad (17)$$

上式中  $C$  为一常数,  $g$  是  $D-E$  曲线准线性部分的斜率, 故

$$D_0 = g\bar{E}_0 + C, \quad D_1 = g\bar{E}_0 M_0 T(\nu) \quad (18)$$

又因为, 按定义,

$$\tau_a = e^{-1.15D} \quad (19)$$

由(19)及(18)式, 可求得:

$$\beta = \frac{d\tau_a}{dE} \Big|_{\bar{E}_0} = -1.15g e^{-1.15D_0} \quad (20)$$

将(20)及(18)式代入(16)式, 得到:

$$\eta = \left[ \frac{1}{2} \beta E_0 M_0 T(\nu) \right]^2$$

由此可见, 对于在一定条件下拍摄的厚正弦振幅光栅, 在满足布喇格角时测定  $\eta$ , 那么其  $\eta$  值与膜层厚度无关, 可用薄正弦振幅光栅的  $\eta$  表示式来计算。

在实验上, 可采用对应于不同空间频率  $\nu$  时, 在满足布喇格角时测出  $\sqrt{\eta}$ , 相对于低空间频率的  $\sqrt{\eta_{\nu \rightarrow 0}}$ , 来求出  $T(\nu)$ , 因为当  $\beta, \bar{E}_0, M_0$  保持不变, 同时可认为在低空间频率  $\nu$  时,  $T(\nu \rightarrow 0) = 1$ , 此时便可得到

$$T(\nu) = \sqrt{\eta} / \sqrt{\eta_{\nu \rightarrow 0}}$$

它是空间频率的函数, 此即为 MTF 曲线。

### 三、一种全息干板的 $\tau_a-E$ 特性曲线

$D-\log E$  曲线或  $\tau_a-E$  曲线可反映感光材料的基本曝光特性。在全息术中, 常采用  $\tau_a-E$  曲线。在实验中, 有时选取平均曝光量使偏置点处于  $\tau_a-E$  曲线准直线部分的中点, 以保证记录具有线性特性。为了选择合适的曝光条件, 我们测定了一种全息干板的  $\tau_a-E$  曲线。在测定时, 采用九阶和十三阶光楔, 用均匀激光照明, 拍摄后, 采用下列显影条件: 显影液 D-19, 显影温度 20°C, 显影时间 5 分。为了使拍摄片子显影条件一致, 将各底

片插在一个小架子上, 并放进盛有新显影液的杜瓦瓶中进行显影, 为了减小显影邻接效应, 在整个显影过程中进行搅动。经显影、定影、自然凉干后, 用测密光度计测量各阶密度  $D$ , 再由公式  $\tau_a = 10^{-D/2}$  换算成  $\tau_a$  值, 然后作出  $\tau_a-E$  曲线(图 2)。

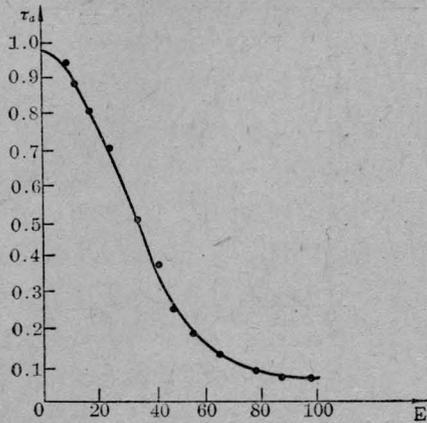


图 2  $\tau_a-E$  实验曲线

#### 四、双光束激光干涉实验装置

拍摄正弦振幅透射光栅的实验装置, 实际上就是双光束激光干涉仪, 如图 3 所示。

由 He-Ne 激光器 1 发出的激光, 通过扩散透镜 2, 并聚焦于针孔光阑 3 然后再通过准直透镜 4 变成平行激光束。5 是光阑, 6 由两块直角棱镜组成, 边棱上用真空镀膜法镀上不同反射率的反射层。为了实验需要, 可以选择不同反射率的反射镜。我们在测定 MTF 时, 采用光强比为 1:7。反射层把通过 5 而来的平行光束分成两束, 7、8 是可转动的反射镜, 它们使两束相干光束相交在干涉

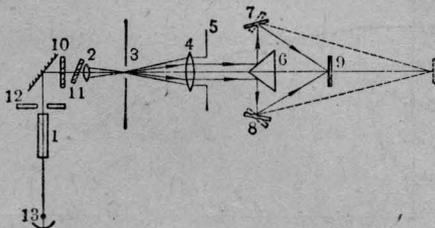


图 3 双光束激光干涉实验装置示意图

仪的光轴上。在垂直于仪器光轴的平面内, 于会聚光的各处可放置感光板 9, 感光板的法线平分两光束的夹角, 可减小底板感光膜的收缩效应所引起的干涉条纹的空间频率和条纹方位的变化。为了获得不同空间频率的干涉条纹, 底板应沿光轴移动, 即作纵向移动。为了对同一空间频率进行分别曝光, 底板盒应垂直于光轴移动, 即作横向移动。当底板盒作纵向移动后, 要转动反射镜 7、8 使两相干光束重新交于光轴上的底板盒上。要改变照度时, 可由滤光器 10 控制。采用光楔 11 补偿由于底板作纵向移动时所引起的曝光平面照度的变化, 在实验中亦采用改变曝光时间来补偿照度的变化, 在此曝光范围内, 倒易律不失效。12 是快门, 曝光时间自动控制。由激光器另一端窗口射出的激光束射进硅光电池 13, 用来监视输出功率的稳定性。在我们实验条件下, 选择的最佳曝光量相应于平均密度为 0.6, 此时可获得最大的衍射效率。同时, 要保证在不同的空间频率时, 具有相同的曝光量。整个实验装置放在防震台上。实验中, 采取了一些消除杂散光的措施。底板拍摄后, 其显影条件与制作  $\tau_a-E$  曲线时相同。为了使感光膜均匀凉干, 底片在定影水洗后, 放在 15%、50%、75% 乙醇中漂洗, 最后自然凉干。

#### 五、衍射效率 $\eta$ 的测定

测量正弦振幅透射光栅的衍射效率的方法由图 4 所示。由激光器射出的激光束通过

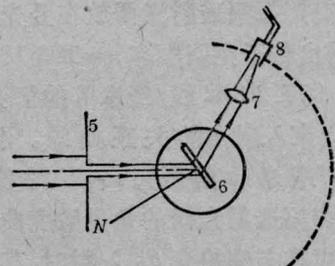


图 4 测定  $\eta$  装置的示意图

望远镜系统后成为平行激光束。由光阑 5 限制成窄平行激光束。透射光栅 6 放置于分光仪刻度盘上。平行激光束射到透射光栅上, 由透镜 7 把衍射光束会聚, 并投射到光电倍增管 8 的光阴极上。此时可测量到第一级衍射光强  $I_1$ 。再测量通过透射光栅衬底的光强  $I_r$ , 那么  $I_1/I_r$  即为衍射效率  $\eta$ 。测量光强时, 必须都在光电倍增管的线性范围内进行。

因为衍射效率  $\eta$  与全息干板密度  $D$  有关, 我们做了不同空间频率的  $\eta-D$  曲线。图 5 是  $\nu=229$  线/毫米时  $\eta-D$  曲线。在我们的实验条件下, 当  $D=0.6$  左右时,  $\eta$  为极大。这时正相应于  $\tau_a-E$  曲线准直线部分的中点。因此, 我们在测定 MTF 时, 均选择  $D=0.6$  左右时进行测量。

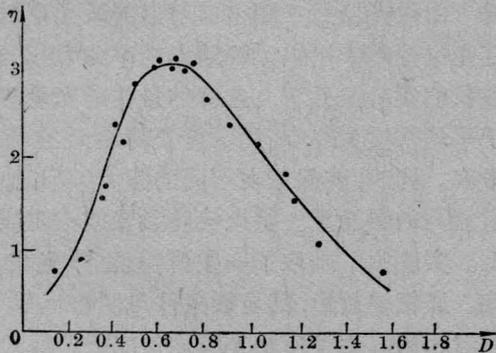


图 5  $\eta-D$  曲线

我们所采用的全息干板, 经显影、定影、凉干后, 膜层厚度经测定平均为 7 微米, 在低空间频率时, 可以认为是薄光栅, 但在高空间频率时, 干涉条纹具有一定的深度分布。随着空间频率的增加, 逐步地表现出其衍射效率对重现激光束入射角具有愈来愈大的角灵敏度。我们把振幅透射光栅放在分光仪旋转平台上, 测出若干空间频率  $\nu=106, 181, 414, 524, 744, 977, 1322$  线/毫米等的衍射效率  $\eta$  与重现光束入射角的关系曲线。图 6 是  $\nu=524$  线/毫米 ( $a$  曲线),  $\nu=1322$  线/毫米 ( $b$  曲线) 振幅透射光栅的角灵敏度曲线。当重现激光束在布喇格角  $\theta_B$  入射时, 其衍射效率  $\eta$  达到极大。对于光栅  $\nu=524, 744, 977,$

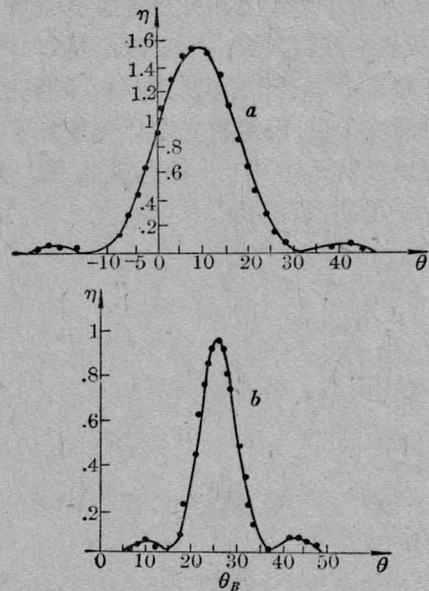


图 6  $\eta-\theta$  曲线

1322 线/毫米等所测的角半宽度  $\Delta\theta_{1/2}$  的数值与理论值基本符合。

## 六、MTF 曲线

我们测量了一种全息干板的 MTF 曲线, 共拍摄了空间频率  $\nu=100$  线/毫米至  $\nu=2069$  线/毫米范围内许多空间频率的正弦振幅透射光栅。并选取光密度  $D \approx 0.6$  的振幅透射光栅来测量其  $\eta$  值。对于厚光栅来说, 都在满足布喇格角条件下进行测量。根据关系式

$$T(\nu) = \sqrt{\frac{\eta_\nu}{\eta_{\nu \rightarrow 0}}}$$

即可求出各个空间频率的  $T(\nu)$ 。作出全息干板的 MTF 曲线, 如图 7 所示。

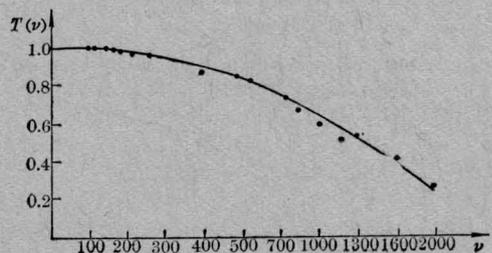


图 7 MTF 曲线