

制作具有预期位相调制度的卤化银乳胶 位相型薄全息光栅的研究*

熊秉衡 王正荣 张永安 余灿麟

(云南工业大学激光研究所, 昆明 650051)

摘 要 提出了一种制作具有预期位相调制度的卤化银乳胶位相型薄全息光栅的方法。它通过分析所拍摄的第一张全息光栅的数据来获得最佳曝光参量, 从而使继后的拍摄, 在同样的实验条件下能获得所预期的位相调制度。文中给出了这方法的理论分析和某些应用。

关键词 卤化银乳胶, 位相型, 薄全息光栅, 位相调制度。

1 引 言

在制作全息光栅时, 怎样获取最佳的拍摄参数以便制作出符合要求的全息光栅来, 这是全息工作者所十分关注的问题。本文进行的工作就是研究如何在制作卤化银乳胶位相型, 薄全息光栅时从已拍摄的第一张全息光栅获取信息, 得到最佳拍摄参数, 从而在继后的拍摄中能获得预期的结果。

对位相型, 薄全息光栅而言, 位相调制度决定了全息光栅的主要性质。因此, 能控制位相调制度的取值就能决定全息光栅的主要性质。为做到这一点, 首先要解决位相调制度的测量问题。本文提出了一种方法, 它通过分析全息光栅的零级和一级衍射来间接地测量出它的位相调制度, 并获得在同样实验条件下的最佳的拍摄参数。从而使全息工作者在继后的拍摄中能获得预期的结果。文中给出了这种方法的理论依据、测量位相调制度和强度透射系数的方法以及控制位相调制度取值的方法, 还给出了它在实时全息干涉计量中获得最佳条纹反衬度的实际应用。实验表明, 此方法是行之有效的。

2 位相调制度的测量及其理论依据

为简单计, 讨论一维的情况(其结果可推广到二维)。设物光和参考光分别表为

$$O(x) = O_0(x) \exp [j\Phi_0(x)], \quad R(x) = R_0 \exp [j\Phi_R(x)] \quad (1)$$

若曝光时间为 t , 记录干板上的曝光量可表为

$$E(X) = \{O_0^2 + R_0^2 + 2O_0R_0 \cos [\Phi_0(x) - \Phi_R(x)]\}t$$

* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1996 年 3 月 13 日; 收到修改稿日期: 1996 年 10 月 31 日

$$\begin{aligned}
 &= (O_0^2 + R_0^2) \{ 1 + [2O_0R_0/(O_0^2 + R_0^2)] \cos(\Phi_0 - \Phi_k) \} t \\
 &= I_0 t \{ 1 + [2B^{1/2}/(1+B)] \cos(\Phi_0 - \Phi_k) \} \\
 &= E_0 [1 + V \cos(\Phi_0 - \Phi_k)]
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中 $I_0 = O_0^2 + R_0^2$ 为平均光强, $E_0 = I_0 t$ 为平均曝光量, $B = R_0^2/O_0^2$ 为光束比, $V = 2B^{1/2}/(1+B)$ 为条纹可见度。位相型薄全息光栅的复振幅透射率可表为^[1]

$$T_a(x) = b_t \exp [j\Phi(x)] \tag{3}$$

在透射率的相位 $\Phi(x)$ 与曝光量 $E(x)$ 成正比的情况下

$$\left. \begin{aligned}
 T_a(x) &= b_t \exp(j\gamma E_0) \exp [j(\gamma E_0 V) \cos(\Phi_0 - \Phi_k)] = K \exp [j\alpha \cos \theta] \\
 K &= b_t \exp(j\gamma E_0), \quad \alpha = \gamma E_0 V, \quad \theta = \Phi_0 - \Phi_k
 \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中 γ 为曝光量常数。应用贝塞尔函数展开式并只考虑零级和一级衍射时, 有

$$\begin{aligned}
 T_a(x) &= K \{ J_0(\alpha) + 2j J_1(\alpha) \cos \theta \} \\
 &= K \{ J_0(\alpha) + J_1(\alpha) \exp [j(\theta + \pi/2)] + J_1(\alpha) \exp [-j(\theta - \pi/2)] \}
 \end{aligned} \tag{5}$$

当以原参考光照明全息光栅时, 即入射光为 $u_i = R = R_0 \exp [j\Phi_k]$ 时, 衍射光的复振幅分布为

$$\begin{aligned}
 u(x) &= u_i T_a(x) \\
 &= u_0 + u_{+1} + u_{-1} \\
 &= K \{ J_0(\alpha) R_0 \exp [j\Phi_k] + J_1(\alpha) R_0 \exp [j(\Phi_0 + \pi/2)] \\
 &\quad + J_1(\alpha) R_0 \exp [-j(\Phi_0 - 2\Phi_k - \pi/2)] \}
 \end{aligned} \tag{6}$$

零级衍射光强 I_0 与一级衍射光强 I_1 之比 B' 为

$$B' = (I_0/I_1) = |u_0|^2 / |u_1|^2 = [J_0(\alpha)/J_1(\alpha)]^2 \tag{7}$$

于是, 测出 I_0, I_1 , 算出比值 B' , 就可以从(7)式判断位相调制度 α 的取值。为有助于作出迅速的判断。把它们对应值列在表 1 中。

Table 1. Relationship of $J_1^2(\alpha)$, $[J_0(\alpha)/J_1(\alpha)]^2$ and phase modulation

α	$J_1^2(\alpha)$	$J_0^2(\alpha)/J_1^2(\alpha)$	α	$J_1^2(\alpha)$	$J_0^2(\alpha)/J_1^2(\alpha)$
0.1	0.0025	398.0	1.3	0.2725	1.411
0.2	0.0099	99.00	1.4	0.2933	1.096
0.3	0.0220	43.48	1.5	0.3113	0.8416
0.4	0.0384	24.01	1.6	0.3248	0.6385
0.5	0.0587	15.00	1.7	0.3339	0.4745
0.6	0.0822	10.12	1.8	0.3381	0.3419
0.7	0.1082	7.174	1.9	0.3378	0.2350
0.8	0.1360	5.266	2.0	0.3326	0.1506
0.9	0.1648	3.958	2.1	0.3230	0.0859
1.0	0.1937	3.023	2.2	0.3091	0.03943
1.1	0.2218	2.335	2.3	0.2915	0.01057
1.2	0.2483	1.814	2.4	0.2706	0.00002

一级衍射的衍射效率为

$$\eta_1 = I_1/I_i = |u_1|^2 / |u_i|^2 = |K|^2 J_1^2(\alpha) = b_t^2 J_1^2(\alpha) = T J_1^2(\alpha) \tag{8}$$

式中 $T = |K|^2 = b_t^2$ 为全息光栅的强度透射系数。 η_1 可以通过测量 I_1 和 I_i 的值而得到, α 值可通过测量 I_0 和 I_1 之值而得到。于是, 应用(8)式便能得到强度透射系数 T 之值。实验表明,

在一般情况下 T 是不可以忽略不计的。

3 以卤化银乳胶作记录材料时, 对位相调制度 α 之取值的控制方法

(4) 式表明: α 值取决于平均曝光量 E_0 , 条纹可见度 V 和曝光量常数 γ 。而 E_0 取决于参、物光的平均光强, V 取决于参、物光比, γ 则取决于化学处理与记录材料的性能。在拍摄与处理过程中严格控制实验条件。使用同一型号乃至同一包装的全息干板或软片, 使用同样的化学试剂、处理方法、处理时间、处理温度……那么, 所拍摄的每张全息光栅的曝光量常数 γ 值可保持为恒量。如果每次拍摄再保持平均光强 I_0 不变, 光束比 B 不变, 也即可见度 V 不变。这时, 全息光栅的位相调制度 α 就只决定于曝光时间 t , 并与 t 呈线性关系(在这里, 只考虑正常曝光, 正常处理条件下的情况。而不考虑强光, 短曝光和弱光, 长曝光出现的对易律失效的情况)。于是, 便可以通过控制曝光时间 t 来控制位相调制度 α 的取值。若第一次拍摄的位相型, 薄全息光栅 H_1 的曝光时间 t_1 , 所达到的位相调制度之值用上述方法检测为 α_1 。而根据实际需要所打算要拍摄的全息光栅应具有位相调制度, 也即预期的位相调制度之值为 α_{exp} , 则再次拍摄的最佳曝光时间 t_{opt} 为

$$t_{\text{opt}} = \alpha_{\text{exp}} t_1 / \alpha_1 \quad (9)$$

当然, 也可以用其他方法来控制位相调制度之取值。

在实验中还应注意的是: 当光场中光强分布不均匀时, 应选取几个代表性的点进行测量, 分别计算它们的光束比, 并以它们的平均值来估算位相调制度之值及最佳曝光时间。

4 在实时全息干涉计量法中获得高反衬度的干涉条纹

在实时全息法中要想获得高反衬度的干涉条纹是不容易的。而采用了这种方法, 就不难得到高反衬度的条纹, 从而提高了检测的精度。应用实时全息法检测物体的状态变化时, 若参、物光仍由(1)式表达, 而物光只发生位相上的变化。变化的物光可表为^[2]

$$O'(x) = O_0(x) \exp \{j[\phi_0(x) + \Delta\phi(x)]\} \quad (10)$$

当以原参考光和变化了的物光 $O'(x)$ 照明全息图时, 只考虑沿物光方向传播的两项衍射光, 即

$$\begin{aligned} U_{+1} &= K J_1(\alpha) R_0 \exp \{j[\phi_0(x) + (\pi/2)]\}, \\ u_0'' &= K J_0(\alpha) O_0 \exp \{j[\phi_0(x) + \Delta\phi(x)]\} \end{aligned} \quad (11)$$

它们迭加后的光强分布为

$$\Phi = [K J_0(\alpha)]^2 \{ (AR_0)^2 + O_0^2 + 2AR_0O_0 \cos [\Delta\phi(x) - (\pi/2)] \} \quad (12)$$

$$A = J_1(\alpha) / J_0(\alpha) \quad (13)$$

条纹反衬度为

$$\begin{aligned} V &= (\Phi_{\text{max}} - \Phi_{\text{min}}) / (\Phi_{\text{max}} + \Phi_{\text{min}}) \\ &= 2AR_0O_0 / [(AR_0)^2 + O_0^2] = 2AB^{1/2} / [1 + (AB^{1/2})^2] \end{aligned} \quad (14)$$

对(14)式求导可得其极值条件为

$$AB^{1/2} = 1 \quad \text{即} \quad B = 1/A^2 = [J_0(\alpha) / J_1(\alpha)]^2 \quad (15)$$

时,反衬度有最大值 $V = V_{\max} = 1$ 。

用实时全息干涉计量法时,测量位相调制度可采用另一种方法。实验可分以下四步进行^[3]。

1) 设定光束比,拍摄第一张全息图 H_1 。

2) H_1 经化学处理复位后,先遮去物光单独用参考光照明 H_1 ,测出(11)式对应的光强 I_1 。然后遮去参考光,单独用物光照明全息图。测出对应的光强 I_0' 。

3) (1) 计算比值

$$B'' = I_1/I_0' \quad (16)$$

(2) 根据(11)式

$$B'' = |U_{+1}|^2/|U_0|^2 = B[J_1(\alpha)/J_0(\alpha)]^2 \quad \text{或} \quad B/B'' = [J_0(\alpha)/J_1(\alpha)]^2 \quad (17)$$

算出 B/B'' ,查表 1 可得对应的位相调制度之值。

(3) 根据预期的位相调制度 α_{exp} 之值和(9)式计算最佳曝光时间 t_{opt} 。

4) 保持相同的实验条件,以最佳曝光时间 t_{opt} 拍摄第二张全息图。

两个实验实例。

第一个实例的拍摄对象为位相物体—酒精灯火焰。其拍摄光路如图 3(a) 所示。图中 M 为反射镜,BS 为分束镜,SF 为空间滤波器,CL 为准直镜,SL 为扩束镜,G 为毛玻璃,LG 为液门。全息干版 H 放在其内。O 为酒精灯置放位置。全息图曝光时酒精灯并不放入光路。待拍摄并处理好实时全息图后再放入光路,并点燃观察。因此,实际上是相当于拍摄一张全息光栅。选光束比为 $B = 1.10$,这是平均值。实验在光场内取上,中,下,左,右五个点分别测它们的光束比。所有数据列于表 2 中。以曝光时间 $t_1 = 19.7 \text{ s}$ 拍摄第一张全息图。在液门中经原位显影,定影,漂白后再现,测出五个点的 $B'' = I_1/I_0'$ 的值。也列于表 2 中,并以下标 1 表示是第一张全息图对应之值。由这些数据可得第一张全息图的位相调制度的平均值为 $\alpha_1 = 2.13$ 。其条纹反衬度 V_1 在 44.2% 至 54.7% 之间。条纹清晰度较差。如图 1(a),图 2(a) 所示。由(15)式和表 1 可知,光束比为 $B = 1.10$ 时所对应的最佳位相调制度,也即预期的位相调制度之值应为 $\alpha_{\text{exp}} = 1.40$ 。由(9)式可计算出最佳曝光时间为 $t_{\text{opt}} = 13.0 \text{ s}$ 。利用此数据曝光,其他条件不变,所获得的第二张全息图的检测数据列于表 2,并以下标 2 表示。此时所获得的位相调制度已达到了预期之值。条纹反衬度 V_2 在 99.5%~100% 的范围。条纹极为清晰。将干涉图纹投影在毛玻璃屏上,用相机拍摄下干涉图纹(相机在图 3 中以 C 表示)。如图 1(b),图 2(b) 所示。

Table 2. Data of the first experimental demonstration

	B	B_1''	B/B_1''	$V_1(\%)$	B_2''	B/B_2''	$V_2(\%)$
uper	1.15	11.3	0.10	54.7	0.93	1.24	99.9
center	1.07	18.4	0.06	44.2	0.81	1.32	99.5
lower	1.07	18.4	0.06	44.2	1.00	1.07	100.0
left	1.15	14.9	0.08	48.6	1.07	1.08	99.9
right	1.07	14.9	0.07	48.6	0.93	1.15	99.9
average	1.10	15.6	0.07	48.1	1.10	1.17	99.8

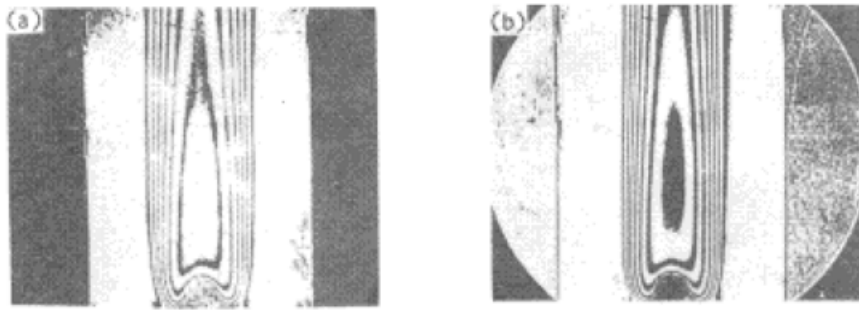


Fig. 1 Holographic interferogram of the flame of an alcohol burner with (a) low contrast, (b) high contrast

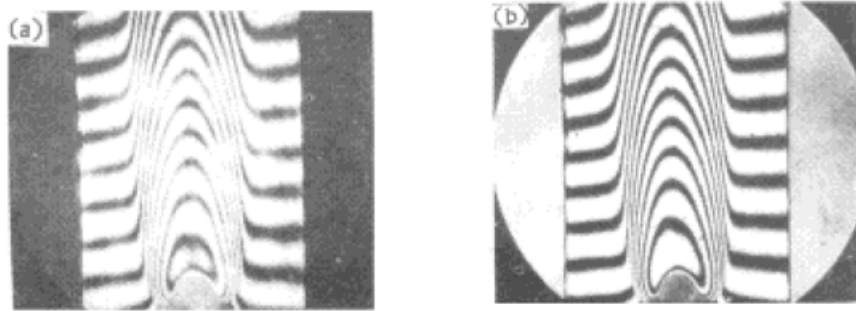


Fig. 2 Interferogram of the flame of an alcohol burner with wedge reference fringes (a) low contrast (b) high contrast

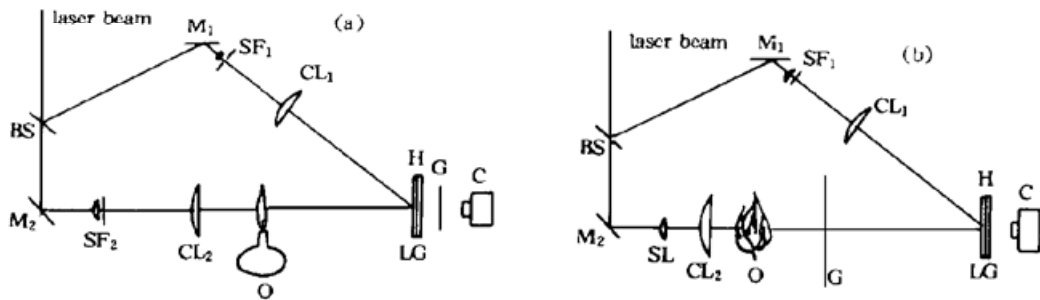


Fig. 3 (a) Schematic diagram of the optical setup for study the temperature field of the flame of an alcohol burner, (b) Schematic diagram of the optical setup for study the combustion process of an solid rocket propellant sample

第二个实例是研究一种固体燃料(火箭推进剂)的燃烧过程。其拍摄光路如图 3(b) 所示。图中符号与前例相同。O 为固体燃料。全息图曝光时 O 并不放入光路, 全息图记录的实际上是一块从背后照亮的大毛玻璃。待拍摄并处理好实时全息图后再把固体燃料放入光路, 并点燃观察。同时通过实时全息图对它用具有连续自动拍摄功能的照相机拍摄记录其燃烧时的条纹及条纹变化现象。图 4 是该照相机照下的许多照片当中任选的两张。由于物光光路上有尺寸为 $200\text{ mm} \times 255\text{ mm}$ 的毛玻璃, 距全息干版的距离为 300 mm 。为了有较高的衍射效率应使参物光比大些。这里所选的光束比为 $B = 5.91$ 。这也是平均值。所有的数据列于表 3 中。以曝光时间 11.3 s 拍摄第一张全息图, 并测得其位相调制度之平均值为 $\alpha_1 = 1.41$ 。条纹清晰度较差, 如图 4(a) 所示。同样, 由(15)式和表 1 可以算出光束比 $B = 5.9$ 时所对应的最佳位相调制度为 $\alpha_{\text{opt}} = 0.77$ 。由(9)式可得最佳曝光时间为 $t_{\text{opt}} = 6.17\text{ s}$ 所拍摄的第二张全息图的检测数据列于表 3 中并以下标 2 表示。此时, 其位相调制度也已基本达到所期望之值。条纹反衬度甚佳。如图 4(b) 所示。

Table 3. Data of the second experimental demonstration

	B	B_1''	B/B_1''	$V_1(\%)$	B_2''	B/B_2''	$V_2(\%)$
uper	4.92	5.31	0.93	73.0	1.07	4.60	99.9
center	7.46	6.15	1.21	69.4	1.15	6.49	99.7
lower	4.60	5.34	0.86	72.9	0.93	4.95	99.9
left	6.06	6.52	0.93	67.9	0.81	7.48	99.4
right	6.50	4.51	1.44	77.1	1.23	5.29	99.5
average	5.91	5.57	1.07	72.1	1.04	5.76	99.7

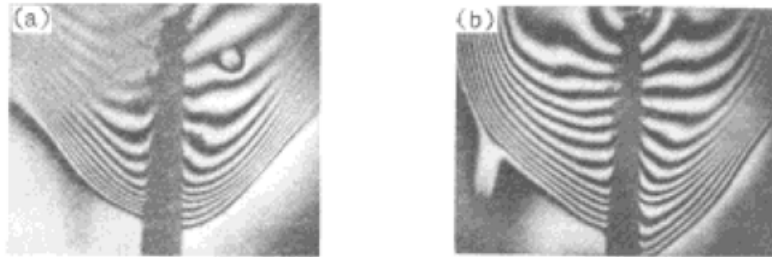


Fig. 4 Holographic interferogram of the combustion process of an solid rocket propellant sample. (a) low contrast (b) high contrast

5 拍摄能产生三束等光强光束的分束器

这种光栅有一些特殊用途,可用作产生三束等光强光束的衍射光栅,例如文献[4]采用了正弦光栅来代替朗奇(Ronchi)光栅,用三光束产生的干涉图纹检测透镜的球面象差,慧差和像散。文中使用的正弦光栅具有一束强的零级衍射光和两束弱的一级衍射光。如果采用三束等光强光束必将有更好的效果,干涉图纹将获得更高的反衬度。制作这种光栅的关键也在于正确控制位相调制度的取值。由(6),(7)式可知,当 $B' = 1$ 也就是

$$J_0(\alpha) = J_1(\alpha) \quad (18)$$

时

$$|u_0|^2 = |u_{+1}|^2 = |u_{-1}|^2$$

零级和一级衍射光具有相等的光强。查表1可知,此时全息图的位相调制度 $\alpha = 1.44$ 。有人还提出了一种利用正交光栅来拍摄图象阵列的方法,其关键是首先要制作一个能产生9束等光强衍射光的正交光栅。其条件也是满足(18)式。也就是位相调制度 $\alpha = 1.44$ 。制作这种光栅的困难也在于位相调制度之值不易控制。而采用了本文的方法也就不难做到了。

结束语 根据以上所述,此方法的意义是通常若人们只关心获得高衍射效率的全息光栅,可通过衍射效率与曝光量、衍射效率与条纹可见度、曝光量与光密度或曝光量与透射率的基本实验,也可以摸索到它们之间一定的规律性。然而,在很多情况下,正如拍摄高反衬度实时全息图和拍摄能产生三束等光强光束的衍射光栅的要求条件那样,只靠上述数据还是不足以获得所需要的最佳曝光参数的。这方法不仅可用于以卤化银乳胶作记录材料的位相型薄全息光栅的拍摄,而且还可用于以光刻胶、光导热塑料等记录材料制作的浮雕全息光栅的拍摄,只是在后者情况下,位相调制度决定于更多的因素。控制就更困难一些。关于在拍摄和处理光刻胶浮雕全息光栅的实际过程中如何控制位相调制度的取值问题将在另文中讨论。

参 考 文 献

- [1] H. M. 史密斯, 全息记录材料, 北京, 科学出版社, 1984
- [2] 于美文编著, 光学全息及信息处理, 北京, 国防出版社, 1984
- [3] 熊秉衡, 王正荣, 张永安, 可获得高反衬度干涉条纹的实时全息记录方法. 光子学报, 1996, **25**(8) : 707~ 712
- [4] Jenn-An Lin *et al.*, Quantitative three-beam Ronchi test. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(13) : 1912~ 1918

A Study for Making a Thin Silver-Halide Phase Hologram with an Expectation Phase Modulation

Xiong Bingheng Wang Zhengrong Zhang Yongan She Canlin

(*Laser Institute, Yunnan Polytechnic University, Kunming 650051*)

(Received 13 March 1996; revised 31 October 1996)

Abstract A new method for making a thin silver-halide phase holographic grating with an expectation phase modulation is proposed. The optimum exposure parameter can be obtained by analysing the data of the holographic grating which was made at the first step. Then the subsequent thin phase holographic gratings with expectation phase modulation can be made under the same experimental conditions as in the first step. The theoretical analysis and some applications of this method are discussed.

Key words silver-halide, thin, phase holographic grating, phase modulation.