

彩虹全息 的 反 射 显 示

单启蛰 陈桂丛 顾久静 林 挺
(山东海洋学院物理系)

提 要

本文讨论了彩虹全息的反射显示方法。在全息片后置一高反镜,可获得高衍射效率的反射重现像。正确选取全息片的偏置透射率,可使反射显示的衍射效率接近或略高于透射显示的衍射效率。为获得优质的重现像,须适当选取全息片与高反镜的间隔。文中同时给出了理论分析及实验结果。

透射全息片由于需重现光透射显示,限制其某些使用场合,尤其是全息片作三维像观像时,透射重现光束的安排常是不方便的。R. S. Sirohi 提出了一种透射全息片反射显示原理^[1],蔡履中等人对这种显示方法的成像位置作了分析^[2],在此方法中,利用全息片干涉条纹的微弱后向散射光波前来重现成像,全息片的衍射效率是低的。R. S. Sirohi 指出,这种显示方法的重现像的散斑较严重。因此重现像质将要降低。

本文提出在透射全息片后加高反膜可达到反射显示的效果。由计算及实验得知,这种显示方法的衍射效率密切依赖于全息底片振幅透射率的偏置点。合理选取偏置点,衍射效率可接近或略高于透射显示的衍射效率,将该方法应用于彩虹全息,可得优质的重现像,使彩虹全息具有反射全息的白光反射重现优点,而其深像、大视场等性能则优于反射全息。

一、反射显示方法描述

设一平面全息片的透射率函数为

$$T(E) = T(E_0) + \beta\tau(u_r^*u_0 + u_r u_0^*) = T(E_0) + T_1 + T_2, \quad (1)$$

式中 E 为拍摄全息片的曝光量, E_0 为底片 $T \sim E$ 曲线直流偏置工作点的曝光量, β 为工作点斜率, u_r 及 u_0 分别为参考波及物波的复振幅, τ 为曝光时间。为简便计算,式中将 $|u_r|^2$ 及 $|u_0|^2$ 项的效果都归入直流项 $T(E_0)$ 。

该全息片在重现光 u_p 的照明下,全息片处的透射场为

$$u_p T(E) = u_p T(E_0) + u_p T_1 + u_p T_2. \quad (2)$$

若在全息片后置一高反镜(如图1所示),则场 $u_p T(E)$ 传播中经高反镜 M 反射,并再次透过全息片 H 。若暂不考虑全息片 H 及高反镜 M 间距对成像的影响,则第二次透过全息片的场为

$$u_p T^2(E) = u_p [T^2(E_0) + T_1^2 + T_2^2 + 2T(E_0)T_1 + 2T(E_0)T_2 + 2T_1T_2]. \quad (3)$$

不难看出上式各项的成像性质,上式中

$$u_p [T^2(E_0) + 2T_1 T_2] = u_p [T^2(E_0) + 2\beta^2 \tau^2 |u_r|^2 |u_0|^2] \tag{4}$$

为反射显示的直流分量，其传播方向沿高反镜的镜向反射方向。(3)式中

$$u_p 2T(E_0) T_1 = u_p 2T(E_0) \beta \tau u_r^* u_0 \tag{5}$$

代表物的正像(orthoscopic image)。若将该项和透射显示(2)式的正像项 $u_p T_1$ 比较，可知它们的差别仅在于一个因子 $2T(E_0)$ 。该因子的出现由于(5)式所代表的正像系由两个像叠加的结果，其中一个像是第一次由全息片衍射重现的正像经高反膜反射并透过全息片的直流项 $T(E_0)$ ，以后我们称该像为衍射——反射——衰减像(DRA)；另一个是重现光 u_p 透过全息片直流项 $T(E_0)$ 经反射后在全息片衍射形成的正像，以后我们称该像为衰减——反射——衍射像(ARD)。(5)式的重现像处在透射重现 $u_p T_1$ 像的镜向反射方向(图1)。在反射显示三维像的观察中，我们关心的是(5)式的项。

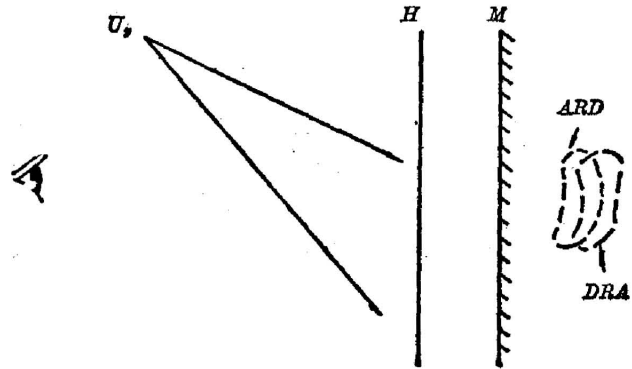


图1 反射显示装置原理图

Fig. 1 Schematic of the reflection display device

(3)式中

$$u_p 2T(E_0) T_2 = u_p 2T(E_0) \beta \tau u_r u_0^* \tag{6}$$

重现出反射显示的虚像。

(4)式、(5)式和(6)式的像都是易分离的。(3)式中

$$u_p T_1^2 = u_p \beta^2 \tau^2 u_r^{*2} u_0^2, \quad u_p T_2^2 = u_p \beta^2 \tau^2 u_r^2 u_0^{*2} \tag{7}$$

分别为物波 u_0 的正及虚的畸变像。由于(7)式中因子 u_r^{*2} 及 u_r^2 的存在，观察时很容易将它们和(5)式的重现正像分离开来。

二、全息片和反射镜的间距对成像的影响

设被拍摄全息的物体为一点源，重现光为平行光，分析全息片及高反镜的间距 d 对反射显示成像模糊量的影响。现在只考虑(5)式表达的正像。

(1) 衍射——反射——衰减像

图2中，在重现平行光 u_p 照射下，设重现像为 $(x_i, y_i, -z_i)$ ，该像经高反镜 M 反射后坐标为 $(x_i, y_i, z_i + 2d)$ 。

(2) 衰减——反射——衍射像

平行光束 u_p 经高反镜 M 反射后， u_p 的像 u_p' 如图3所示，由 u_p' 重现的像的坐标为 (x_i, y_i, z_i) 。

因此，上述两像沿 z 方向有一位移 $2d$ ，观察者看到的该两像点的距离(模糊)取决于人眼离 z 轴的偏角。将反射显示应用于彩虹全息时，该偏角的数值和重现狭缝 I_s 的长度有关。人眼观察到的该两像点的间距为 $|2d \sin \theta|$ (如图4所示)。当间距 d 大时，能看到位错

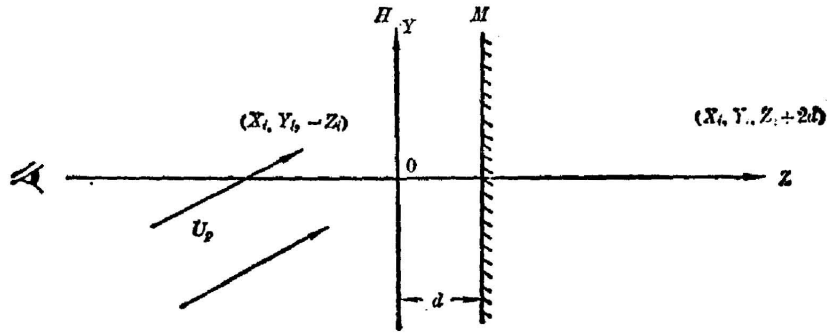


图 2 衍射——反射——衰减像的成像位置

Fig. 2 Imaging position of diffraction-reflection-attenuation image

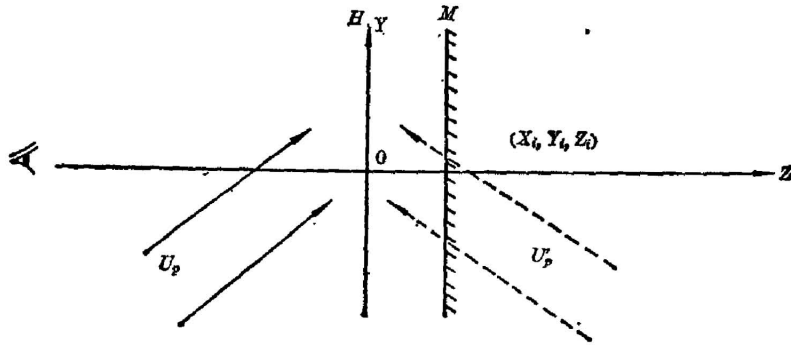


图 3 衰减——反射——衍射像的成像位置

Fig. 3 Imaging position of attenuation-reflection-diffraction image

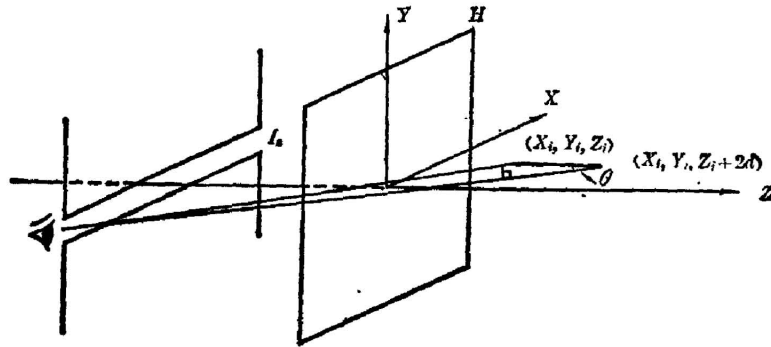


图 4 反射显示模糊量

Fig. 4 Blurring of reflection display

为 $|2d \sin \theta|$ 的双像，为了看到清晰的像， d 必须足够小，这时两像相互重叠。但当 d 过小时，将看到两像的干涉条纹，由于两像的振幅相同（各为 $u_p T(E_0) \beta r u_0^*$ ）。干涉图样具有较高的对比度，严重破坏了像质，因此这种反射显示方法不能应用于激光重现的全息片。将该法应用于彩虹全息时，由于观察的准单色光的较差时间相干性及有限大小的重现白光光源的较差空间相干性，不难得到清晰的无干涉条纹的重现像。

由全息片及高反镜间距 d 的存在，狭缝也会出现沿 z 方向位移为 $2d$ 的二重现像（对某一波长的重现光）。该双重狭缝对重现物像的附加色模糊是微小的，其原因是：（1）二重现狭

缝象的位移是沿轴向 z 方向,不是沿横向方向;(2)取 $2d=0.3\text{ mm}$ (见后文“实验结果”),该位移量远小于彩虹全息中采用的狭缝宽度。

三、衍射效率

反射显示的正像项(5)式中,衍射——反射——衰减像及衰减——反射——衍射像的振幅各为 $u_p T(E_0) \beta \tau u_r^* u_0$,强度各为 $|u_p T(E_0) \beta \tau u_r^* u_0|^2$ 。在彩虹全息反射显示中,由于间距 d 的存在,破坏了该两像场的相关性。因此与忽略间距 d 所导出的(5)式不同,该两场不满足振幅叠加要求,观察到的像应为该两像的强度叠加。因此总的强度应为 $2|u_p T(E_0) \beta \tau u_r^* u_0|^2$ 。由(2)式,透射重现的正像项的强度为

$$|u_p T_1|^2 = |u_p \beta \tau u_r^* u_0|^2。$$

因此反射显示和透射显示衍射效率之比为

$$\frac{\eta_{\text{反射}}}{\eta_{\text{透射}}} = \frac{2|u_p T(E_0) \beta \tau u_r^* u_0|^2}{|u_p \beta \tau u_r^* u_0|^2} = 2T^2(E_0)。(8)$$

对于一般的透射全息底片,选取 $T(E_0) \approx 0.5$ 时可获得最大透射重现衍射效率。由上式可知,这时 $(\eta_{\text{反射}}/\eta_{\text{透射}}) = 1/2$ 。当选取 $T(E_0) > 0.5$ 时,由上式可知, $(\eta_{\text{反射}}/\eta_{\text{透射}}) > 1/2$ 。对于位相型彩虹全息, (1)~(7)式不再成立,但由同理推论, (8)式的最后结论是正确的。位相型彩虹全息的强度平均透射率 $T^2(E_0) \approx 0.6$,因而 $\eta_{\text{反射}}/\eta_{\text{透射}}$ 可大于 1。从上面讨论可知,衍射——反射——衰减像及衰减——反射——衍射像都因有衰减及实际上存在的反射损耗,使每一像的衍射效率要低于 $\eta_{\text{透射}}$,但二像叠加的总衍射效率却有可能大于 $\eta_{\text{透射}}$ (当选取适当的 $T(E_0)$ 时)。这可理解为反射显示的方法将透射显示的部分零级能量转移至一级分量。

四、实验结果

全息底片乳剂面和高反膜的间距 d 应由实验确定。在我们的实验中选取 $d=0.15\text{ mm}$ 时干涉条纹消失。为了说明反射显示对模糊量的影响,我们选用了长重现狭缝彩虹全息片^[8],对应的图 4 中的 θ 角约为 $\pm 18^\circ$,因此模糊量 $|2d \sin \theta| \approx 0.09\text{ mm}$ 与彩虹全息重现光

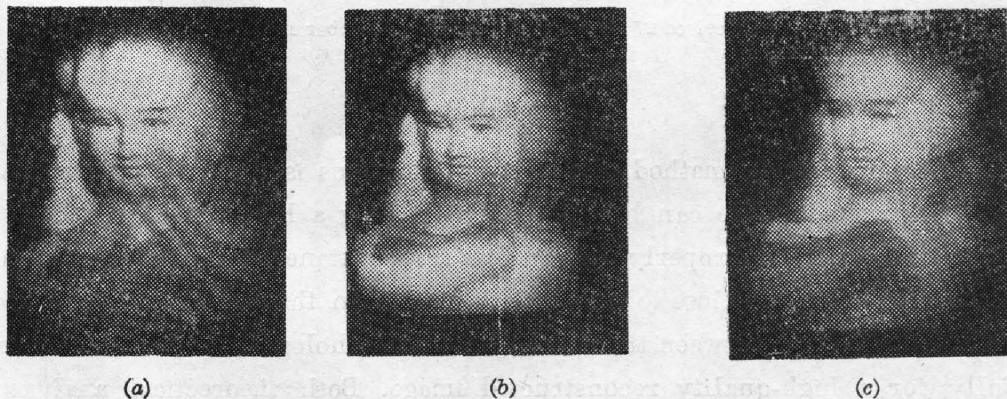


图 5 彩虹全息反射显示照片

Fig. 5 Photographs of the reflection display of rainbow hologram

源有限尺寸、狭缝宽度及散斑等因素带来的模糊量相比,上述模糊量是轻微的。对于一般的彩虹全息片, $|\theta| < 18^\circ$ 的模糊量较上述数值小。

图 5 为白炽灯光源重现下反射显示拍摄的照片。图 5(a) 中 $d=0$, 全息片紧靠高反膜, 重现像出现明显的干涉条纹。图 5(b) 中 $d=0.15\text{ mm}$, 干涉条纹消失, 图 5(c) 使用了大间距 $d \approx 1\text{ cm}$, 出现明显的双像。

实验获得了高衍射效率的反射显示像。

五、结 论

本文提供了一种适于彩虹全息反射显示方法, 反射显示的衍射效率及像的清晰程度都可与彩虹全息透射显示相媲美, 因此用作三维像的观察是适用的, 且反射显示方法比透射重现要方便得多。提高反射显示的衍射效率的关键是控制适度的偏置透射率。

全息片与高反镜的间距要选取适当, 间距过小, 重现像要存在干涉条纹; 间距过大, 则会使重现像带来模糊。

作者在工作中与李萱、余希湖同志进行了有益的讨论, 并在实验工作时受到他们的支持, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] R. S. Sirohi; *Opt. Acta*, 1974, **21**, No. 1 (Jan), 75.
- [2] 蔡履中, 吕良晓;《激光》, 1982, **9**, No. 10 (Oct), 621.
- [3] 单启蛰等; (待发表)

Reflection display of rainbow holograms

SHAN QIZHE CHEN GUICONG GU JIJING AND LIN TING

(Department of Physics, Shandong College of Oceanology, Qingdao)

(Received 27 July 1984; revised 20 December 1984)

Abstract

A reflection display method of rainbow holograms is discussed. A bright and sharp reconstructed image can be obtained by setting a high-reflectance metal film behind the hologram. A properly choiced bias transmittance of the hologram can lead to a diffraction efficiency close to or a little higher than that of transmission reconstruction. The distance between the metal film and the hologram should be determined carefully for a high-quality reconstructed image. Both theoretical analysis and experimental results are presented.