

一种利用象散改进的白光重现全息术

徐慎初 刘守

(福建师范大学物理系激光研究室)

提要: 在普通的象平面全息术中,重现象跨立在全息图上,在全息图前方的象将引起视觉的混乱。本文用离轴象散理论得出能使象平面全息术的白光重现象位于全息图后方,从而避免视觉混乱的实验条件,并给出相应的实验结果。我们用这种方法,获得了清晰、明亮、没有斑纹,并且位于全息图后方的白光重现立体象。

White-light reconstruction holography improved with astigmatism

Xu Shenchu Liu Shou

(Laser Research Laboratory, Department of Physics, Fujian Teachers University)

Abstract: Ordinary image-plane holography requires the reconstructed image to straddle over the hologram, thus the image in front of the hologram causes visual confusion.

This paper describes our experiments using non-paraxial astigmatism theory to make the white-light reconstructed image on the image-plane holography appear behind the hologram, thus avoiding visual confusion. All conditions for the experiments and the results are given in detail. Using this method, we have obtained a clear, bright, speckle-less white-light reconstructed stereoscopic image, located behind the hologram.

一、引言

已经知道,用扩展的白光光源照明全息图时,如果重现象到全息图的距离增大,那么象模糊也增大。因此,为了保证象的清晰度,普通的象平面全息术中,总是使重现象跨立在全息图上。但是,经验又证明,这样做会产生一个相反的结果,就是位于全息图前方的象将引起用眼睛观看重现象时视觉的混乱,从而影响了人们所看到的立体象的清晰度和视差性质。现在,我们撇开全息图前方象引起视觉混乱的物理和生理的原因^[1],而只单纯

地要求象平面全息图的白光重现象全部位于全息图的后方,又不增大象模糊,以此避开视觉混乱的问题,从而保证能观察到具有最佳清晰度和良好视差性质的三维立体象。

K. Bazargan 和 M. R. B. Forshaw 在 1980 年发表了一个新颖的想法来解决这个问题,就是利用控制第一个全息图重现象的象散量来使得第二个全息图的白光重现象在全息图的后方^[2]。

本文与参考文献[2]的不同是:(1)我们用离轴理论得出更为具体和明白的实验条件,并用实验结果予以证实;(2)为了操作方

收稿日期:1980年12月29日。

便,光路安置在水平面内,因此所控制的实验条件有所不同;(3)为了兼顾白光重现现象的亮度,第一个全息图的重现采用 S. A. Benton 两步彩虹全息术中会聚光照明方法^[3]。

二、理 论

如果全息图的振幅透过率和记录时的曝光量成线性关系,只要用原始参考波或它的共轭波照明全息图,则重现现象是没有象差的,因为此时如果原始物波是球面波,而重现波也是一个同样的球面波。而如果照明波既不全同于原始参考波,也不全同于它的共轭波,那么重现现象就会有象差,此时原始物波如果是球面波,重现波就不再是一个严格的球面波了。当记录时用的光波波长 λ_r 和重现时用的光波波长 λ_c 一样($\lambda_r = \lambda_c$),并且全息图在记录和重现时的放大比 $m=1$ 时,全息象差只与记录和重现时的几何参量有关。

在图1所示的坐标系中,设全息图 H_1 在记录和重现时完全一样地安置在 xy 平面, y 轴竖直向上, x 轴在水平面内,坐标原点在 H_1 的中心。记录时,参考点光源 r 和物点 O 的位置坐标分别是 (x_r, y_r, z_r) 和 (x_0, y_0, z_0) 。重现时,照明点光源 C 和重现的高斯象点 I 的位置坐标分别是 (x_c, y_c, z_c) 和 (x_I, y_I, z_I) 。这些点到坐标原点的距离分别是 R_r, R_0, R_c 和 R_I 。

按照 E. B. Champagne 的离轴理论^[4],象差象和高斯象之间的三级位相差是:

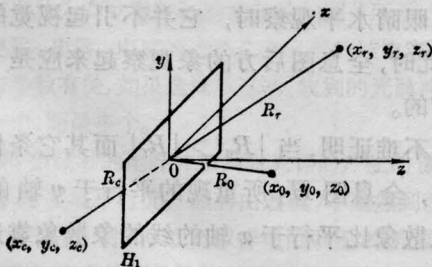


图 1

$$\phi_3 = \frac{2\pi}{\lambda_c} \left[-\frac{1}{8} \rho^4 S + \frac{1}{2} \rho^3 (\cos \theta C_x + \sin \theta C_y) - \frac{1}{2} \rho^2 (\cos^2 \theta A_x + \sin^2 \theta A_y + 2 \cos \theta \sin \theta A_{xy}) \right] \quad (1)$$

式中 $\rho = x/\cos \theta = y/\sin \theta$, 相应的象差是:

球差

$$S = \frac{1}{R_c^3} \pm \left(\frac{1}{R_0^3} - \frac{1}{R_r^3} \right) - \frac{1}{R_I^3} \quad (2)$$

慧差

$$C_x = \frac{x_c}{R_c^3} \pm \left(\frac{x_0}{R_0^3} - \frac{x_r}{R_r^3} \right) - \frac{x_I}{R_I^3} \quad (3)$$

$$C_y = \frac{y_c}{R_c^3} \pm \left(\frac{y_0}{R_0^3} - \frac{y_r}{R_r^3} \right) - \frac{y_I}{R_I^3} \quad (4)$$

象散

$$A_x = \frac{x_c^2}{R_c^3} \pm \left(\frac{x_0^2}{R_0^3} - \frac{x_r^2}{R_r^3} \right) - \frac{x_I^2}{R_I^3} \quad (5)$$

$$A_y = \frac{y_c^2}{R_c^3} \pm \left(\frac{y_0^2}{R_0^3} - \frac{y_r^2}{R_r^3} \right) - \frac{y_I^2}{R_I^3} \quad (6)$$

$$A_{xy} = \frac{x_c y_c}{R_c^3} \pm \left(\frac{x_0 y_0}{R_0^3} - \frac{x_r y_r}{R_r^3} \right) - \frac{x_I y_I}{R_I^3} \quad (7)$$

由于考虑的是点源,(1)式不含畸变和场曲。上述公式中,高斯象点的坐标应满足:

$$\frac{1}{R_I} = \frac{1}{R_c} \pm \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_r} \right) \quad (8)$$

$$\frac{x_I}{R_I} = \frac{x_c}{R_c} \pm \left(\frac{x_0}{R_0} - \frac{x_r}{R_r} \right) \quad (9)$$

$$\frac{y_I}{R_I} = \frac{y_c}{R_c} \pm \left(\frac{y_0}{R_0} - \frac{y_r}{R_r} \right) \quad (10)$$

以上所有公式中, \pm 号相应于两个重现象。 R_r 如为正值,表示虚象; R_I 如为负值,表示实象。

我们的目的是,寻求一定的条件,使得全息图 H_1 被重现照明时,水平方向的象散象比竖直方向的象散象靠近 H_1 。为此,我们先作如下的假设:

(1) 记录时参考源和重现时照明源安置在水平面内,使得 $y_c = y_r = 0$;

(2) 记录时参考波和物波都是发散的,使得 $R_r > 0, R_0 > 0$,并且物比参考源靠近全息图,即 $R_0 < R_r$;

(3) 重现时照明源是会聚的点光源, 它安放的位置与记录时参考源的位置在同一方向上, 即 $R_c < 0$, $\frac{x_c}{R_c} = -\frac{x_r}{R_r}$ 。

在这些假设下, 对于一个重现的实象 ($R_l < 0$), 式(8)、(9)、(10)简化为:

$$\frac{1}{R_l} = \frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_r}, \quad (11)$$

$$\frac{x_l}{R_l} = -\frac{x_0}{R_0}, \quad (12)$$

$$\frac{y_l}{R_l} = -\frac{y_0}{R_0}. \quad (13)$$

并且(5)式简化为:

$$A_x = \left(\frac{x_c^2}{R_c^2} - \frac{x_0^2}{R_0^2} \right) \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_r} \right) \quad (14)$$

(6)式简化为:

$$A_y = -\frac{y_0^2}{R_0^2} \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_r} \right) \quad (15)$$

从(1)式知道, 平行 y 轴的线的象散象, 因象散而产生相对于高斯象的位相差可按 $\theta = 90^\circ$ 或 270° 估算为:

$$\begin{aligned} \phi'_{3y} &= \frac{2\pi}{\lambda_c} \left[-\frac{1}{2} \rho^2 A_y \right] \\ &= \frac{\pi}{\lambda_c} \rho^2 \frac{y_0^2}{R_0^2} \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_r} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

因为 $R_l < 0$, 为了使平行于 y 轴的线的象散象成在离全息图 H_1 更远的地方, 应当使 $\phi'_{3y} < 0$ 。从(16)式看出, 这应当要求 $\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_r} < 0$ 。因 $R_c < 0$, $R_r > 0$, 故应要求 $|R_c| < |R_r|$ 。

从(1)式又知道, 对于和上述平行于 y 轴的线处于同一个平面(该平面和 xy 平面相平行)内的平行于 x 轴的线, 其象散象相对于高斯象的位相差, 可按 $\theta = 0^\circ$ 或 180° 估算为:

$$\begin{aligned} \phi'_{3x} &= \frac{2\pi}{\lambda_c} \left[-\frac{1}{2} \rho^2 A_x \right] \\ &= -\frac{\pi}{\lambda_c} \rho^2 \left(\frac{x_c^2}{R_c^2} - \frac{x_0^2}{R_0^2} \right) \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_r} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

因为 $R_l < 0$, 为了使平行于 x 轴的线的象散象成在离全息图 H_1 较近的地方, 应当

使 $\phi'_{3x} > 0$, 从(17)式看出, 这应当要求 $\left(\frac{x_c^2}{R_c^2} - \frac{x_0^2}{R_0^2} \right) \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_r} \right) < 0$, 现在因为已要求 $\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_r} < 0$, 所以还应要求 $\left| \frac{x_c}{R_c} \right| > \left| \frac{x_0}{R_0} \right|$ 。

于是, 在上述假设下, 为使全息图 H_1 所重现的平行于 y 轴的线的象散象比平行于 x 轴的线的象散象远离全息图 H_1 (或者说平行于 x 轴的线的象散象比平行于 y 轴的线的象散象靠近全息图 H_1), 应满足的实验条件是 $\left| \frac{x_c}{R_c} \right| > \left| \frac{x_0}{R_0} \right|$ 和 $|R_c| < |R_r|$ 。它们的物理意义是容易理解的。 $\left| \frac{x_c}{R_c} \right| > \left| \frac{x_0}{R_0} \right|$, 也就是 $\left| \frac{x_r}{R_r} \right| > \left| \frac{x_0}{R_0} \right|$, 说明记录全息图 H_1 时, 应当使参考点光源比物更加离轴, 在这种离轴条件下, 在各种单色象差中, 象散是为主的。 $|R_c| < |R_r|$, 说明只要控制会聚点光源比参考点光源靠近全息图 H_1 , 就可以使重现平行于 y 轴的线的象散象的波比重现平行于 x 轴的线的象散象的波有更大的曲率半径。

当满足这些实验条件时, 如果在平行于 x 轴的线的象散象处记录第二个全息图 H_2 (它相当于一个象平面全息图), 那么, 用白光对 H_2 进行重现照明, 眼睛沿着水平方向观察, 就看到完全位于全息图 H_2 后方的象。只要平行于 y 轴的线的象散象到 H_2 的距离是在白光重现时眼睛所容许的色散范围内, 所观察到的全息图 H_2 后方的重现象(它具有水平视差性质)就足够清晰。而当眼睛沿竖直方向观察时, 所看到的重现象就与一个普通象平面全息图重现象的情形一样。因为平行于 x 轴的线的象散象不具有水平视差, 所以当眼睛水平观察时, 它并不引起视觉的混乱, 此时, 全息图后方的象观察起来应是十分清晰的。

不难证明, 当 $|R_c| > |R_r|$ 而其它条件不变时, 全息图 H_1 所重现的平行于 y 轴的线的象散象比平行于 x 轴的线的象散象靠近全息图。

如果记录时参考点光源和重现时照明点光源安置在竖直平面内, 即 $x_r = x_c = 0$, 为使平行于 y 轴的线的象散象比平行于 x 轴的线的象散象较远离全息图 H_1 , 所需实验条件应是:

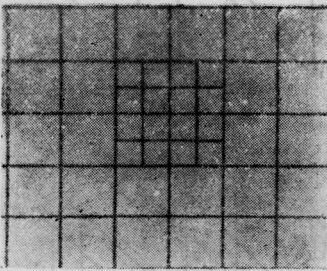
$$|R_c| > |R_r| \quad \text{和} \quad \left| \frac{y_r}{R_r} \right| = \left| \frac{y_c}{R_c} \right| > \left| \frac{y_0}{R_0} \right|。$$

三、实 验

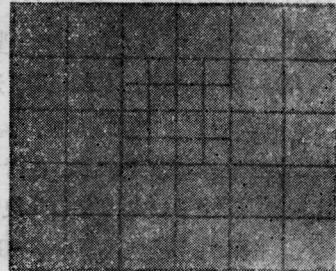
我们首先对一个平面状物作全息记录与重现, 以验证前述的理论。然后, 对一个立体物记录第一个全息图, 再对第一个全息图重

现的象散象记录第二个全息图, 以得到所要求的白光重现现象。

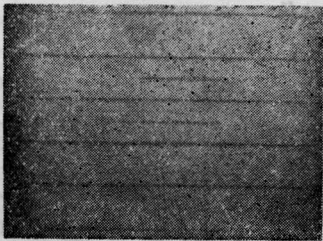
图 2(1) 是平面状物的照片。这个物高 5 厘米, 宽 6 厘米, 由一些平行于 y 轴的线和一些平行于 x 轴的线组成。物平面垂直于 z 轴放置, 并且平行于 xy 平面, 它到 xy 平面的距离 $z_0 = 13$ 厘米。记录时全息底片安置在 xy 平面, 参考点光源 r 的位置是 $y_r = 0$, $R_r = 58$ 厘米, $\alpha_r = 20^\circ$, α_r 是矢径 R_r 和 x 轴正方向的夹角。物用扩散的氩-氦激光照明。全息底片为天津 I 型全息干板。记录和重现时所用的光源均为波长 6328 \AA 的氩-氦激光器。



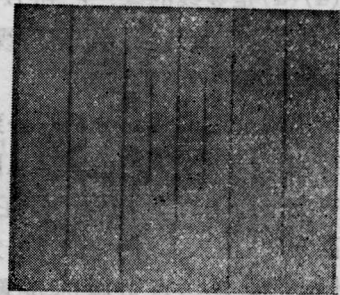
(1)



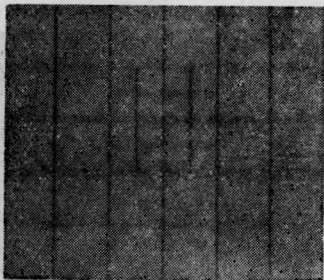
(2)



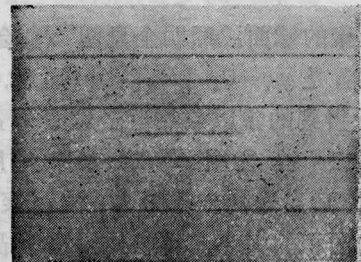
(3) (a)



(3) (b)



(4) (a)



(4) (b)

图 2 四个象, 是图 2 所示的平面状物作全息记录与重现的象散象记录第二个全息图, 以得到所要求的白光重现现象。

经曝光和处理后所得全息图 H_1 放回原处,用会聚的球面波进行照明,该会聚点光源 c 的位置由 y_c 、 R_c 和 α_c 的值决定。

当 $y_c = y_r = 0$, $R_c = -58$ 厘米 (负号表示会聚波), $\alpha_c = \alpha_r = 20^\circ$ 时,重现象是一个无象差的正立的实象,它到 H_1 的距离为 13 厘米。图 2(2) 是这个无象差实象的照片。

当 $y_c = y_r = 0$, $|R_c| < 58$ 厘米, $\alpha_c = \alpha_r = 20^\circ$ 时,重现象是象散的实象,平行于 y 轴的线的象散象成在离全息图 H_1 较远的地方,平行于 x 轴的线的象散象成在离全息图 H_1 较近的地方。图 2(3) 是当 $y_c = y_r = 0$, $R_c = -30$ 厘米, $\alpha_c = \alpha_r = 20^\circ$ 时重现象的照片,其中照片 (3)(a) 是横线的象,它到 H_1 的距离测得约为 10.5 厘米;照片 (3)(b) 是竖线的象,它到 H_1 的距离测得约为 12.5 厘米。

当 $y_c = y_r = 0$, $|R_c| > 58$ 厘米, $\alpha_c = \alpha_r = 20^\circ$ 时,重现象也是象散的实象。平行于 y 轴的线的象散象比平行于 x 轴的线的象散象靠近全息图 H_1 。图 2(4) 是当 $y_c = y_r = 0$, $R_c = -100$ 厘米, $\alpha_c = \alpha_r = 20^\circ$ 时,重现象的照片。其中照片 (4)(a) 是竖线的象,它到 H_1 的距离测得为 14 厘米;照片 (4)(b) 是横线的象,它到 H_1 的距离测得为 16 厘米。

以上结果与前述的理论分析是一致的。

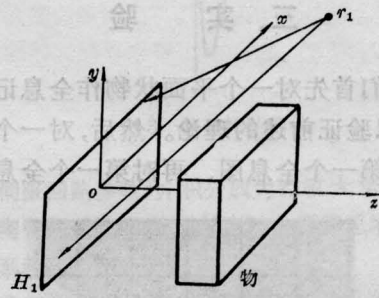
现在我们取一个立体物记录全息图 H_1 。记录时物中心平面平行于 xy 平面,它到 xy 平面的距离为 10 厘米。用扩散的氦-氖激光束照明物体表面。参考点光源的位置是 $y_{r_1} = 0$, $R_{r_1} = 50$ 厘米, $\alpha_{r_1} = 20^\circ$, 如图 3(1) 所示。

用会聚的球面波照明全息图 H_1 , 会聚点光源的位置是 $y_{c_1} = 0$, $|R_{c_1}| < 50$ 厘米, $\alpha_{c_1} = 20^\circ$ 。在所得到的象散象靠近全息图 H_1 的地方记录第二个全息图 H_2 , 如图 3(2) 所示。这里注意,适当选择全息图 H_1 被会聚球面波照明的面积的大小,可以使得重现成象光束有较小的立体角,从而使得全息图 H_2 的白光重现象有较高的亮度。但是,这个面积

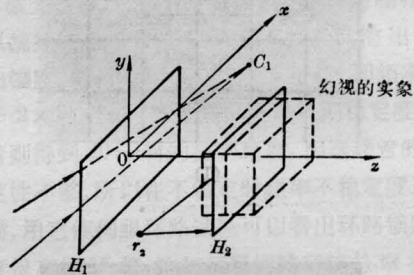
也不宜取得太小,以免在重现象中增大斑纹的可见度。

做全息图 H_2 的白光重现时,眼睛沿水平方向观察,就看到一个完全位于全息图 H_2 后方的白光重现立体象,如图 3(3) 所示。这个象是近于完全消色差的,而且不引起视觉混乱。图 3(4) 就是这个清晰、明亮、没有斑纹

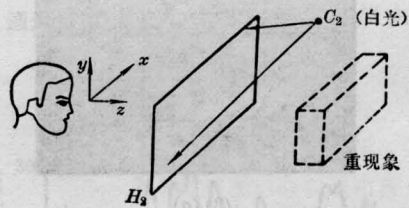
(下转第 7 页)



(1)



(2)



(3)



(4)

图 3

酯环影响较大。内酯环上4-位电负性取代基(CF₃、CN、COOR、COR)将降低受激态能量,使发色团共轭键变形,极性增大,荧光波长红移。电正性取代基(OCH₃、CH₃)在内酯环上取代,将提高激发态能量,极性变小,减弱共轭 π 电子离域倾向,因而荧光波长蓝移。比较C47和C481,前者内酯环4-位是一个电正性取代基CH₃,而C481为电负性取代基CF₃取代,相应的C481荧光红移了~440 Å。

C102代表一类刚化结构香豆素。发色团端基氮原子通过两个饱和的六元环和苯环耦连起来。这就限制了氨基的转动和发色团的变形,并保持发色团的平面结构。因为脂环不参加共轭体系,故对共振辐射和吸收频率影响较小,但却显著地抑制了体系之间的交叉速率,经过刚化的香豆素具有低阈值、高效率、高斜率系数的优点。

2. 对化学稳定性的影响

香豆素分子7-位氨基烷基取代对提高香豆素的光化学稳定性是有利的。未取代的香豆素受激态氨基上氢原子容易离解,取代后香豆素稳定性提高。

C102的稳定性和C47差不多^[3]。

C481和C47虽然结构相似,但由于C4814-是负电性基CF₃-取代,降低了受激

态发色团的激发电位,提高了化学稳定性。在同等闪光灯泵浦功率条件下C481的稳定性较之C47、C102提高了一百倍^[3]。

比较稳定性表明,氨环化反应和氨基烷基化反应对化学稳定性的影响是一样的。香豆素的稳定性主要取决于处于高位态内酯环 β 的稳定性,而负性取代基(CF₃)出现在内酯环对位有助于提高化学稳定性,正电性基的作用正相反。在对二氧六环溶剂中,C481和C152是蓝绿光谱区稳定性最好的染料之一。

3. 对调谐范围和效率的影响

我们测定未取代香豆素C120的调谐范围~350 Å,效率~28%。烷基化后的香豆素调谐范围和效率均有较大提高。

调谐范围以C152、C481为最高,C102次之。能量转换效率则以C102为最高,显然是氨环化的直接后果。调谐宽度提高可能是由于共轭 π 电子离域倾向增加所致。

参 考 文 献

- [1] E. J. Schimitschek; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1973, **QE-9**, 781.
- [2] E. J. Schimitschek; *Opt. Commun.*, 1976, **16**, No. 3, 313.
- [3] U S P 3, 891, 569.
- [4] P. R. Hammond; *Appl. Phys.*, 1975, **8**, 311.

(上接第12页)

纹,完全位于一个玻璃窗口后方的立体象的照片。这种立体象具有假彩色性质。

四、结 论

在全息术中,已有反射全息、彩虹全息和合成全息这三种白光重现技术。后两种方法和象平面全息术有密切的联系,反射全息术目前的新发展也和象平面全息术发生了联系^[5]。因此,本文叙述的这种利用象散改进的白光重现全息术(实质上是利用象散改进的象平面白光重现全息术)是有其实际意义

的。这种方法将象散变害为利,用于改善象的视差效果,能提高象的清晰度。

参 考 文 献

- [1] J. T. Rule; *JOSA*, 1941, **31**, No. 4, 325~334.
- [2] K. Bazargan, M. R. B. Forshaw; *Opt. Commun.*, 1980, **32**, No. 1, 45~47.
- [3] S. A. Benton; "Applications of Holography and Optical Data Processing" (ed. by E. Marom et al.) 1976, 401~409.
- [4] E. B. Champagne; *JOSA*, 1967, **57**, No. 1, 51~55.
- [5] T. Kubota, T. Ose; *Opt. Commun.*, 1979, **28**, No. 2, 159~162.