

实验 49 全息照相

1948 年伽伯(Cabor,D.)曾提出一种无透镜两步成像法,即用一个合适的相干参考波与一个物体的散射波叠加,则此散波的振幅和相位的分布就以干涉图样的形式被记录在感光板上,被记录的干涉图称全息图。用相干光照射全息图,透射光的一部分就能重新模拟出原物的散射波波前,于是重现一个与原物非常逼真的三维图像。由于当时没有足够好的相干光源,所以几乎没有引起人们的注意。1960 年激光的出现促进了全息术的发展。并使这一想法付诸实现。目前全息术已从光学发展到微波、X 射线和声波等其它波动过程,成为科学技术的一个新领域。

【预习重点】

- (1)全息图的记录和再现三维景象的基本原理。
- (2)拍摄全息图的技术要求和有关注意事项。

【实验目的】

- (1) 了解全息照相的基本原理。
- (2) 学习拍摄全息照片和观察再现图像的方法。

【实验仪器】

防震光学平台,氦氖激光器,曝光定时器及快门,扩束透镜(两个),分束器,反射镜(两个),全息 I 型干板, D19 显影液和 F5 定影液及暗房设备。

【实验原理】

1)全息记录

普通照相建立在几何光学透镜成像的基础上,它只反映了像与物的各点具有光强(振幅)分布的对应关系,而缺少光波的相位信息,因此它只是一个二维平面图像。全息照相是建立在波动光学干涉和衍射规律的基础上,它不仅记录光强分布的对应关系,而且记录了相位变化的信息,因此可以复现出原物的三维图像。

全息照相的光路如图 49-1 所示。氦氖激光经分束器 G、反射镜 M 和扩束镜之后,一路成为参考光,另一路被物漫反射成为物光,二者照于感光板 H 上叠加产生干涉图。从物体上漫反射的物光波,其振幅和相位受到物体的调制,振幅给出物体亮度的信息,相位给出物体位置和深度的信息。但相位信息不能直接被感光版 H 记录,而是通过与参考光的干涉,才可将物光波阵面上各点的振幅和相位转换成空间上变化的强度分布,记录在感光版上。因为干涉条纹中包含着待摄物体光波振幅和相位的全部信息,所以经过显影、定影处理的感光板叫做全息图。

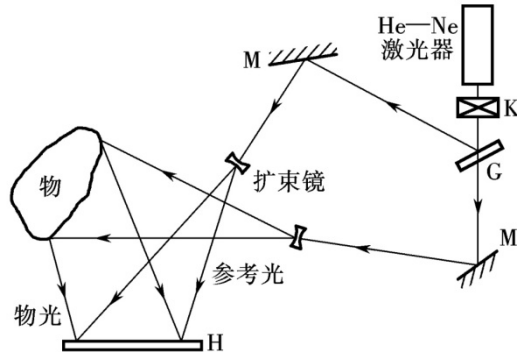


图 49-1 全息照相光路

2) 物光波阵面的再现

全息图如同一块复杂的光栅。如果用原参考光做照明灯，以原角度照射全息图，从另一侧迎着衍射光观察，在沿着照明光束方向传播的零级衍射光的一旁，必然出现一级衍射(图 49-2)。此光束在相当于原物体位置聚成一个虚像，犹如从待摄物体发出的波阵面，可称物光波阵面的再现，这就是全息照相获得的非常逼真的立体像。另一个一级衍射，在全息图后会聚成实像，称作共轭像。

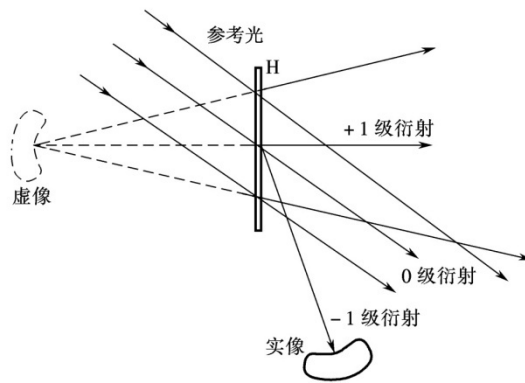


图 49-2 用全息图再现物体光波

3) 全息记录与再现的数学表达

设 xy 平面为全息感光板平面，物光和参考光在此平面的光场分布分别表示为

$$O(x, y) = A_O(x, y)e^{-i\varphi_O(x, y)} \quad (49-1)$$

$$R(x, y) = A_R(x, y)e^{-i\varphi_R(x, y)} \quad (49-2)$$

两式用复振幅同时表达了物光和参考光的振幅和相位的分布，而感光板平面上总的复振幅分布为 $O + R$ 。感光板上的光强分布若省略 (x, y) ，有

$$\begin{aligned} I &= (O + R)(O^* + R^*) = I_O + I_R + OR^* + O^*R \\ &= A_O^2 + A_R^2 + 2A_OA_R \cos(\varphi_O - \varphi_R) \end{aligned} \quad (49-3)$$

式中： R^* 和 O^* 分别为 R 和 O 的共轭复数。

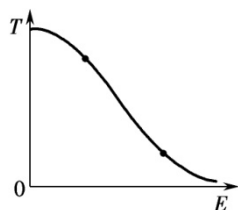


图 49-3 透射率 T 与曝光量 E 关系曲线

照相材料的感光特性曲线(图 49-3)存在一个大致线性范围。如果使曝光量 $E(x, y)$ 在此范围内变化, 则全息图的振幅透射率

$$T(x, y) = T_0 + \beta E(x, y) \quad (49-4)$$

式中: T_0 为未曝光部分的透射率; β 是取决于干板感光特性和显影过程的一个常量。

曝光量等于光强与曝光时间的乘积, 即 $E = It$ 代入式(49-4)得

$$\begin{aligned} T(x, y) &= T_0 + \beta It(x, y) \\ &= T_0 + \beta t(I_0 + I_R + OR^* + O^*R) \end{aligned} \quad (49-5)$$

这就是全息图的透射率分布函数。

在使用与原参考光相同的光波 R 从适当方向照射全息图的时候 $T' = TR$ 。将式(49-5)代入, 得

$$\begin{aligned} T' &= T_0R + \beta t(I_0 + I_R + OR^* + O^*R)R \\ &= [T_0 + \beta t(I_0 + I_R)]R + \beta tI_R O + \beta tRRO^* \end{aligned} \quad (49-6)$$

这里透射光波 T' 的每个分量都表示一个衍射级。

第一项为零级衍射波, 是被衰减了的再现 R 光。

第二项是物光复振幅 O 乘以常量 βtI_R ($I_R = RR^*$), 正是原始物光的再现, 仍按原物光方向传播 (是按一定比例重建的物光, 所以再现光 I_R 越强, 再现像就越明亮), 相当于一级衍射光。它是发散的, 其延长线会聚于物体原来位置上, 为虚像。

第三项 $\beta tRRO^*$, 即 $\beta tA_R^2 A_O e^{-i(2\varphi_R - \varphi_O)}$, 它载有物光的共轭光波 O^* , 是另一个一级衍射, 与物光的相位相反, 在两倍于参考光偏角的方向上会聚成共轭实像。

从以上分析并结合实际观察, 可见全息照相除了具有逼真的三维立体感、全面的视差特性、景深范围较大和成像亮度可调的特点以外, 还能够以局部全息图再现全部物像, 并且可以在同一张干板上变换角度拍摄不同的景物, 再转动全息图, 从不同的角度顺序观察互不重叠的各幅物像。

4) 白光再现全息图

(1) 像平面全息图

一般全息图可认为是大量基元全息图的叠加，是一种复杂的光栅结构。在波前再现过程中，因为白光相干长度很短以及衍射光方向随波长变化决定了再现像点的位置也随波长而变化，所以不能用白光再现。但如图 49-4 所示，若用一个凸透镜使物成像在全息干板上，同时配合参考光，制成像平面全息图之后，即可用白光照明观察再现的像。此时像的位置不随波长变化，只是因光源方向不同，像的颜色会有变化。这种全息图虽然再现像立体效果不佳，在信息处理等技术上仍有应用价值。

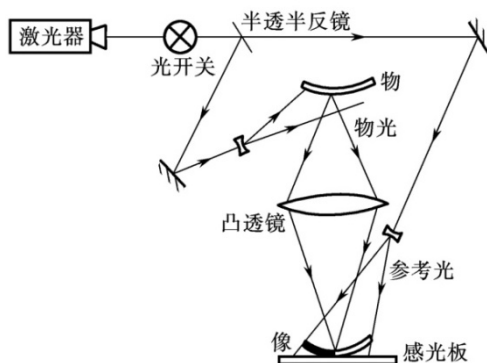


图 49-4 像平面全息图的拍摄光路

(2) 一步彩虹全息图

彩虹全息图实质上也是一种像面全息图。不同的是拍摄一步彩虹全息图时在物和干板之间加一个狭缝，并且透镜成的实像可以离开干板一段距离，所以再现立体效果比像面全息图要强一些。可使狭缝紧靠透镜，取竖直方位。缝宽没有严格限制，可在 0.5~8mm 之间选择。

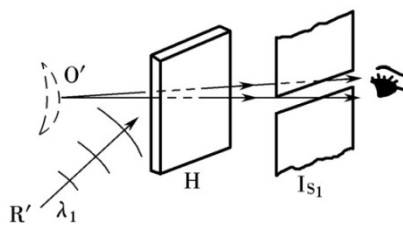


图 49-5 用单色光再现彩虹全息图

设想以波长为 λ_1 的再现光按记录时的参考光方向入射到全息图上(图 49-5)，观察者既能见到物的像又能见到狭缝的实像 I_{S_1} 。看到像点 O_1' 的条件是瞳孔位于从 I_{S_1} 发射的衍射光场中，最佳观察位置是瞳孔恰好在 I_{S_1} 处，如隔窗观景，越近窗口视野越大。同理，对于波长为 λ_2 的再现光，则因衍射角的变化得到错开位置的像点 O_2' 和缝像 I_{S_2} (图 49-6)。如此推广，白光被全息图衍射后即形成一簇从红到紫连续错开排列的彩色物像和色彩分立的狭缝实像。由于狭缝像限制了衍射物光的传播方向和观察范围，观察者的瞳孔对准某一狭缝像只能看到一个准单色物像，所以狭缝起了滤波器的作用，有了它，彩虹全息图才可以用白光再现。但是因视角受透镜孔径限制，狭缝又只允许一定方向和范围的物光通过，所以再现像只保留了沿缝方向的透视效果。

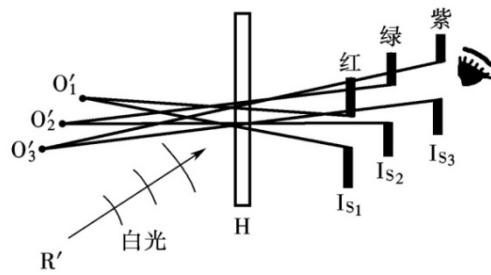


图 49-6 用白光再现彩虹全息图

【实验内容及要求】

- 1)先熟悉实验室布局和暗室设备，了解曝光定时器和各种光学元件支架的调节和使用方法。
- 2)检查全息实验台的防震性能。可以用分束器、反射镜和扩束镜等组成无补偿板的迈克耳孙干涉仪光路，在保持室内安静的条件下，屏上干涉条纹的漂移量在曝光时间内以不超过 1/4 条纹间距为限。如过大，应分析原因，采取稳定措施。

3)参考图 49-1 布置光路制作全息图。

(1) 使各光学元器件中心等高，物光和参考光的光程大致相等，光程差控制在 3cm 以内。

(2) 投射于感光板上的物光与参考光之间的夹角可在 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间选择，观察再现像，宜尽量避开刺眼的直射强光。

(3) 照射到全息干板上的物光和参考光光强相差不要太悬殊。因一般待摄物的漫反射率不高，投射到H面上的物光就相对偏弱，所以要选择分束比合适的分束器，让较强的光照在物上。为比较物光和参考光的强度，在干板架上置一白屏，并调节与屏的距离，使两路光强尽量达到 1:4 左右。

4)曝光和冲洗按以下步骤进行。

(1) 接通曝光定时器，选定曝光时间。使用 $1\sim 2\text{mW}$ 的激光器，预定曝光时间 20s 左右，视物的大小及其反射本领酌情增减。

(2) 在黑暗中或较远处的暗绿色安全灯下把全息干板夹在干板架上（必须是感光剂面朝向被摄物体）。接通激光器电源，保持肃静一两分钟后即可进行曝光。

(3) 把感光后的干板放在显影液中显影 $2\sim 3\text{min}$ （显影液温度 20°C ），再放入停显液中约 20s(或用清水漂一漂)，然后定影5min。可在暗绿灯下操作。定影后的底片应在水池中冲洗掉残留药液，再晾干。

5)波前再现的观察。如图 49-3 所示，让再现光以原参考光束对干板的方位射向全息图，从它的背面观察，在原物所在方位即发生波前再现，可见一个三维虚像。试验并解释局部遮挡对成像的影响。再试以原参考光的共轭光（会聚光或直接用来扩束的激光束）从全息图的背面入射，在另一侧用毛玻璃或白屏寻找实像并记录其相对位置。

眼睛绝不可直视未扩束的激光束，以免造成视网膜的永久损伤。

【拓展与设计】

- (1) 全息光栅的制作。
- (2) 用全息法测量微小位移。