

## 全息照相与观察

全息照相从根本讲，可归结为八个字：“干涉记录，衍射再现”。早在 1948 年，盖伯(D. Gabor)首先创立了它。由于当时难以得到良好的相干光源，这种技术并未发展起来。60 年代初激光器的问世，解决了相干光源的问题，使几乎沉沦的全息技术得以复兴，并在其发展中出现了一个飞跃，成为一个崭新的科学技术领域。由于全息照相记录方式独特，因而比起普通照相来，它具有更多的特点，使用更为广泛，如在精密测量，无损检测，信息存贮及处理，遥感，生物医学和国防科研中获得广泛的应用。

全息照相原理适用于各种波动过程，相应的有微波全息、超声波全息等。

实验提供全息实验装置一套(防震台、反射镜、分束镜、扩束镜、光学支架及磁性座等)，He-Ne 激光器，定时快门，全息感光胶片(干板)，暗室冲洗器材等。

### 【实验原理】

全息照相中所记录和重现的是物光波前的振幅和相位，即全部信息，这是全息照相名称的由来。但是，感光乳胶和一切光敏元件都是“相位盲”，不能直接记录相位。必须借助于一束相干参考光，通过拍摄物光和参考光的干涉条纹，间接记录下物光的振幅和相位。直接观察拍好的全息图，看不到像。只有照明光按一定方向照在全息图上，通过全息图的衍射，才能重现物光波前，使我们看到物的立体像。故全息照相包括波前的全息记录(干涉)和重现(衍射)两部分内容。

下面讨论透射式全息照相原理。

透射式全息照相是指重现时所观察和研究的是全息图透射光的成像。这里讨论对物光和参考光夹角较小的平面全息图的记录及再现过程。

#### 1. 全息记录

如果将物光和参考光的干涉条纹用感光底片记录下来，那就记录了底片所在位置物光波前的振幅和相位(见图 1(a))

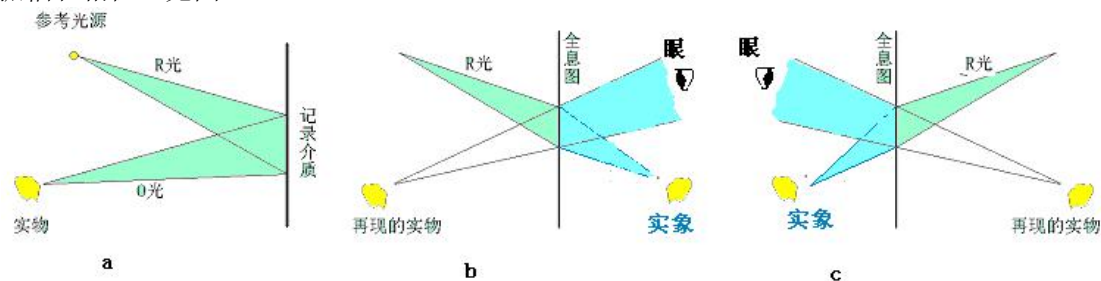


图 1

物光可看作由物体上各点所发出的球面波的叠加。设其中一点  $p(x_0, y_0, z_0)$  发出的球面波为

$$\tilde{U}_0(p) = A_0(p) \exp[i\phi_0(p)] \quad (1)$$

设感光底片所在平面为  $z=0$ ，则此平面上物光波前为

$$\tilde{U}_0(x, y) = A_0(x, y) \exp[i\phi_0(x, y)]. \quad (2)$$

若同波长的参考光，其传播方向在  $y-z$  平面上，且与底片法线成  $\alpha$  角， $z=0$  处参考光波前可表示为

$$\tilde{U}_r(x, y) = A_r(x, y) \exp[i\phi_r(x, y)] \quad (3)$$

此时，底片上总复振幅分布为

$$\tilde{U}(x, y) = \tilde{U}_0(x, y) + \tilde{U}_r(x, y) \quad (4)$$

底片上的光强分布则为

$$I(x, y) = \tilde{U}(x, y)\tilde{U}^*(x, y) \quad (5)$$

以式 (2) (3) (4), 得

$$I(x, y) = A_r^2 + A_0^2 + A_r A_0 \exp[i(\phi_0 - \phi_r)] + A_r A_0 \exp[-i(\phi_0 - \phi_r)] \quad (6)$$

$$\text{或} \quad I(x, y) = A_r^2 + A_0^2 + 2A_0 A_r \cos(\phi_0 - \phi_r) \quad (6')$$

感光底片在曝光后经显影和定影等暗室技术处理, 成为全息图。适当控制曝光量及显影条件, 可以使全息图的振幅透过率  $t$  与曝光量  $E$  (正比于光强  $I$ ) 成线性关系, 即

$$t(x, y) = t_0 - \beta I(x, y) \quad (7)$$

式中  $t_0$  和  $\beta$  为常数。

由上面讨论可看到全息照相的记录过程和普通照相有本质的区别:

- (1) 普通照相中, 物通过透镜成像在底片上, 物、像之间有点点对应关系。全息照相中不用成像透镜, 物、像之间不存在点对应关系。物上每一点发出的球面波照在整个底片上。反之, 底片上每一点又记录了所有物点发出的光波。
- (2) 普通照相中, 底片记录的是光强分布, 而全息底片记录的则是物光和参考光的干涉条纹, 由式 (6') 看出, 当  $\phi_0 - \phi_r = 2n\pi$  ( $n$  为整数) 时, 光强有极大值

$I(x, y) = I_{\max} = (A_r + A_0)^2$ , 当  $\phi_0 - \phi_r = 2(n+1/2)\pi$  ( $n$  为整数) 时, 光强有极小值

$I(x, y) = I_{\min} = (A_r - A_0)^2$ , 干涉条纹的反衬度  $\gamma$  定义为

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \text{ 即 } \gamma = \frac{2A_0 A_r}{A_r^2 + A_0^2} = \frac{2(A_0/A_r)}{1 + (A_0/A_r)^2} \quad (8)$$

$$I(x, y) = \frac{A_0^2 + A_r^2}{1 + \gamma \cos(\phi_0 - \phi_r)}$$

对于一定的参考光 ( $A_r$  为已知),  $\gamma$  取决于  $A_0$ , 换句话说, 干涉条纹的反衬度  $\gamma$  反映了物光振幅  $A_0$ , 而干涉条纹的间距则决定于  $(\phi_0 - \phi_r)$  随位置变化的快慢。也就是说, 对一定的  $\phi_r$  来说, 干涉条纹的间距和取向反映了物光波前的相位分布  $\phi_0(x, y)$ 。因此底片记录了干涉条纹, 也就是记录了物光波前的全部信息—振幅  $A_0$  和相位  $\phi_0$ 。

上面讨论了物光作为一个点光源所产生的球面波和参考光的干涉。整个物是由无数个点光源所组成, 因而整个全息图就是无穷多个球面波与参考波干涉所组成的复杂干涉条纹。

## 2. 物光波前的重现

用一束与参考光完全相同 (即波长和方向相同) 的波如图 1 (b) 所示照在全息图上, 则在  $z=0$  平面上全息图透射光的复振幅分布为

$$\tilde{U}_t(x, y) = \tilde{U}_r(x, y) \cdot t(x, y) \quad (9)$$

将式 (3), (6), (7) 代入式 (9) 得到

$$[t_0 + \beta(A_0^2 + A_r^2)] A_r \exp(i\phi_r) + \beta A_0 A_r^2 \exp(i\phi_0) + \beta A_0 A_r^2 \exp[-i(\phi_0 - 2\phi_r)] \quad (10)$$

上式表明, 透射光包含三部分:

第一项  $[t_0 + \beta(A_0^2 + A_r^2)] A_r \exp(i\phi_r)$  是按一定比例重建的参考光, 沿原来方向传播, 即光栅的零级衍射。

第二项  $\beta A_0 A_r^2 \exp(i\phi_0)$  与物光振动方程完全一样, 只不过振幅乘了一个系数; 这便是按一定比例重建的物光波, 相当于一级衍射波。根据基尔霍夫衍射原理, 这一场分布决定了全息图后面的衍射空间有一个与原始物光波振幅和位相的相对分布完全相同的衍射波。正是这一光波形成了与物体完全逼真的三维立体图像, 从不同的角度去观察, 能看到原被遮住的侧面。

第三项  $\beta A_0 A_r^2 \exp[-i(\phi_0 - 2\phi_r)]$  与物光波的共轭光波有关, 它是因衍射而产生的另一个一级衍射波, 称为孪生波, 它在有些情况下会形成一个发生畸变的, 并且在观察者看来

物体的前后关系与实物相反的实像。

如果照明光方向正好与参考光方向相反，如图 1 (c) 所示。则在  $z=0$  处全息图左侧的透射光复振幅为  $\tilde{U}_r^*(x, y) \bullet t(x, y)$  由计算也得出三个方向的衍射光，但这时实像正好在原来物的位置，而虚像角度有偏离。

对于平面全息图来说，如果重现照明波传播方向不同于参考光波，也能重现虚像和实像，但重现像的位置有相应的变化。

### 3. 参考光为球面波的全息照相

重现照明光的点光源和原参考光点光源必须在相同位置（相对于底片）才能得到无畸变虚像。如要得到无畸变的实像，则应以参考光的共轭光——一束会聚在原参考光点源的会聚光去照明底片。如果重现时点源位置不同于参考光点源，则重现像的位置不同于原来物位置，重现像的放大倍数也不等于 1。照明点光源愈远，像愈大。反之，像缩小。

由此得出全息图的主要特点

(1) 体视特性。使全息图再现物光时，所看到的物体是一幅完全逼真的三维立体像。当我们从不同的角度观察时，就好像面对原物体一样，可以看到物体的正面和被遮的侧面。图-3 就是从不同角度观察同一张全息图时物体像的视差特性。

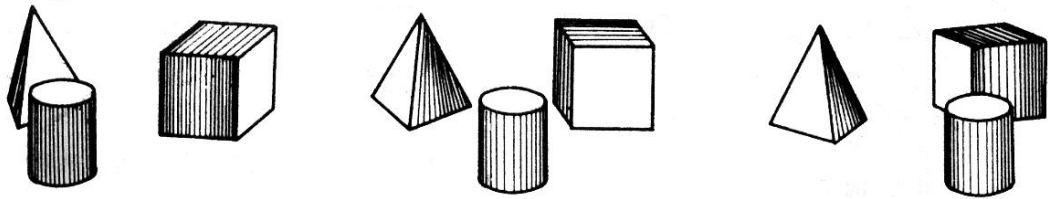


图 2 全息照片的视差特性

(2) 可分割性。全息照相曝光时，干板上的任一小区域都记录了整个被拍物体的物光信息，因此，即使它被弄碎(或掩盖、玷污)了一部分，仍可用残片再现出完整的物像。

(3) 多重记录性。全息照相曝光一次后，只要稍微改变干板的方位(如转一小角度)，就可同一干板上进行两次、三次曝光(在分辨率和总曝光量许可的情况下)，再现时，就可从不同同时角度观察各自的拍摄内容，相互不影响。

(4) 物像亮度、大小可调性。由于再现物光是再现光的一部分，所以再现光强，物像就亮；用不同波长的激光再现，或者沿再现光方向改变全息图的位置，就可看到不同大小的物像。

### 【实验内容】

#### 拍摄系统的技术要求

全息拍摄是在全息干板上记录物光(O光)与参考光(R光)在其上的干涉条纹，为了照出合乎要求的全息图，对拍摄系统有一定的要求。

(1) 要求全息拍摄的光学系统具有很高的机械稳定性。在全息干板上的干涉条纹可达  $10^3$  条 / 毫米数量级，而曝光期间干涉条纹相对于板的位移若大于  $1/2$  条纹间距时，拍摄完全失败。所以拍摄用的所有光学元件必须牢固地用磁钢吸在具有防震性能的平台，曝光时，不要走动，不要大声说话，不要碰着防震台。

(2) 采用良好的相干光源。全息拍摄是干涉记录，光源的相干性直接影响着物光和参考光的干涉效果，所以，全息拍摄必须采用良好的相干光源。目前，一般使用  $H_e-N_e$  激光器作光源。

(3) 高分辨率的感光板。分辨率是指每毫米能记录的条纹数。在全息拍摄中，干涉条纹很细密，每毫米的干涉条纹数大于 1000 条；而普通照相底片每毫米只能记录几十至几百条。所以，必须用高分辨率的全息感光板(干板)作为记录媒介。

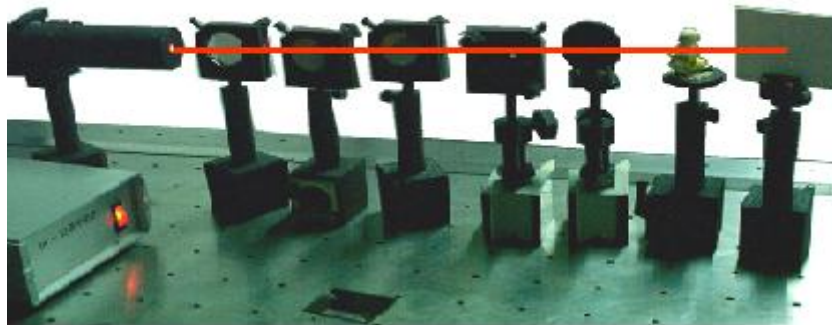
(4) 合理的光路。在上述条件达到的情况下，布置合理的光路也是获得优质全息图的

关键。因此，在排光路时应注意：①受光源的相干长度限制，光路中应尽量减小物光与参考光的光程差，将光程差控制在光源的相干长度(几厘米)之内，最好是等光程拍摄。②物光和参考光投射到干板上的夹角  $\theta$  要适当，一般取  $30^\circ \sim 45^\circ$  为宜。这是因为干板上条纹的间距可表示为  $d = \lambda / 2 \sin \frac{\theta}{2}$ ，如果  $\theta$  小， $d$  就大，对干板的分辨率  $\frac{1}{d}$  要求不高。但是，当用这样拍成的全息图再现时，由于衍射角  $\theta$  与条纹间距  $d$  的关系为  $d \cdot \sin \varphi = k\lambda$ ， $d$  大则衍射角  $\varphi$  小，各级衍射光分不开，观察时很不方便。所以，在注意干板分辨率的同时，又要兼顾  $\pm 1$  级衍射角大一些，夹角  $\theta$  要适当。③物光、参考光在干板上的光强比要合适，一般是  $1:2 \sim 1:6$ ，根据物体表面反射情况和拍摄内容确定。用光强测定仪测或直接用眼睛估测干板架上白屏的照度即可。④为减少于扰，光路中尽量减少光学元件。

具体作如下调整：

在调好激光束平行平台后，以它为基准调整光路基本元件！

### 等高共轴调节：将各个光学元件调至等高



按图 3 布置透射式全息图拍摄光路

### 拍摄全息照片光路的安排

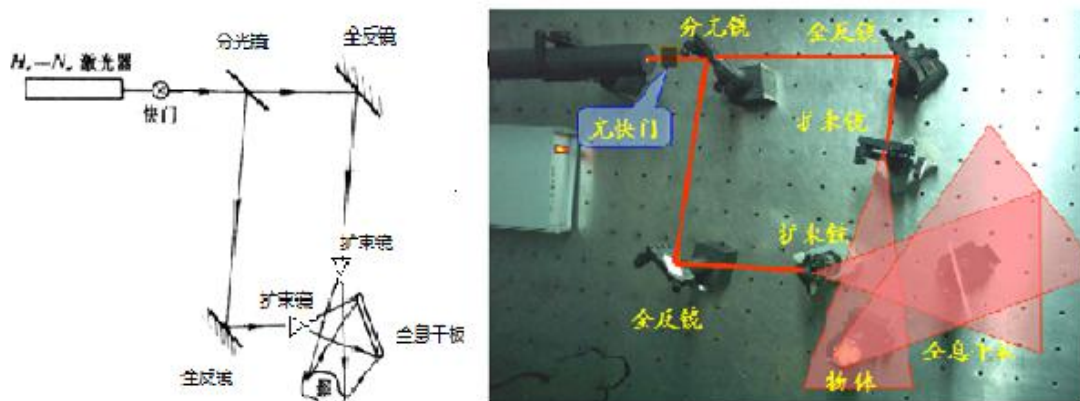
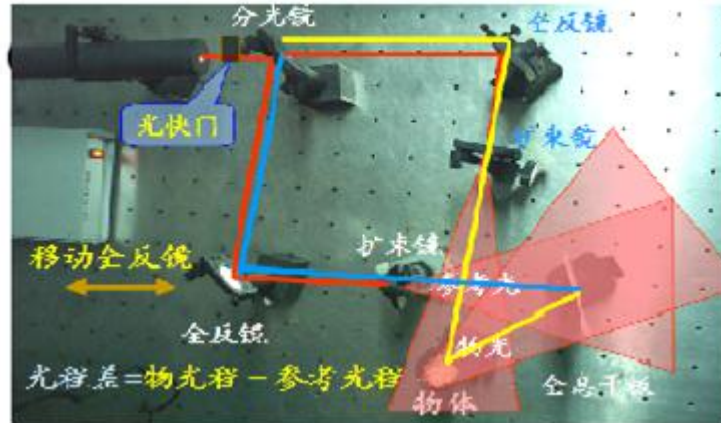


图 3

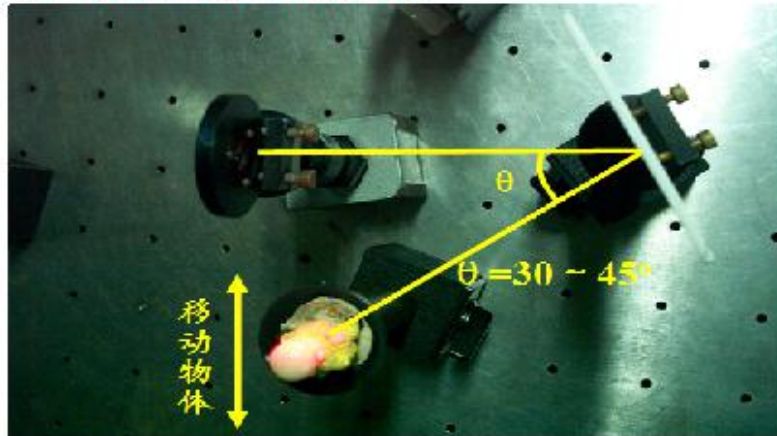
经透镜扩展后的参考光应均匀照在整个底片上，被摄物体各部分也应得到较均匀照明

## 参考光与物光的光程差



物光和参考光的光程大致相等

## 参考光与物光的夹角



参考光与物光的夹角  $30^\circ \sim 45^\circ$

## 全息干板照度比



物光光强



参考光光强

调节扩束镜位置  
可调节光强



全息干板上的光强

在底片处物光和参考光的光强比约为  $1:2 \sim 1:6$

## 2. 曝光

关闭快门挡住激光，将底片装在底片夹上，应注意使乳胶面对着光入射方向。静置二三十分钟

后进行曝光。曝光过程中绝对不准触及防震台，并保持室内安静。

### 3. 冲洗处理

即显影定影。显影液采用 D-19，定影液采用 F-5。它们由实验室提供。如室温较高，显影后底片应放在 5%冰醋酸溶液中停显后再定影。显影定影温度以 20 摄氏度最为适宜。显影时间 2~3 分钟，定影时间 5~10 分钟。定影后的底片应放在清水中冲洗 5~10 分钟（长期保存的底片定影后要冲洗 20 分钟以上），晾干。

## 二、透射式全息图的重现

用透镜将激光扩束后照明全息图，尽可能使光照方向沿原参考光方向观察虚像。

问题：

1. 当改变观察角度时虚像有什么不同？为什么从全息图能看到立体像而普通照片只能看到平面像？
2. 平移全息底片，使其向光源靠近或远离，观察像的变化。
3. 用一张有  $\phi = 5\text{mm}$  小孔的黑纸贴近全息底片，人眼通过小孔观察全息虚像，你看到的是再现像的全部还是局部？移动小孔的位置，看到虚像有何不同？

### 【注意事项】

1. 遵守光学实验的操作规定。
2. 曝光过程中避免人为的震动，保持肃静。
3. 遵守暗房操作规程。
4. 注意安全，不要直视激光束，不要随便触摸激光器和电源。

### 【思考题】

1. 什么是全息照相？它与普通照相有何不同？
2. 全息拍摄的技术要求是什么？
3. 全息照相的主要特点是什么？