

全息照片的摄制

201711140236 物理系基地班 李励玮

实验仪器

防震台，激光器，电子定时器（快门），分束镜，平面反射镜 2 个，扩束透镜 2 个，载物平台，物体，全息干板架，全息干板，线，白屏等。

实验原理

全息照相技术通过物体散射光（物光）和参考光的干涉，把物光波前的振幅和相位以干涉条纹的形式记录在照相干板上，即记录了光波的全部信息，在一定条件下，能将所记录的全部信息完全再现出来。

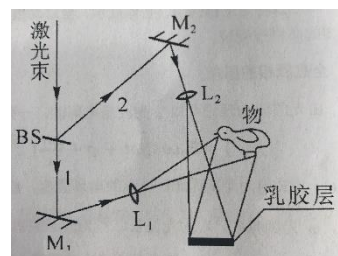
分为透射式全息和反射式全息两种：

1. 透射式

在记录全息图时，全息干板位于物光和参考光的同侧，再现像是由透过全息图的衍射光形成的，这种全息叫做透射式全息图。

点光源参考光与物光在空间相干叠加，叠加光强度极大值的轨迹为对称于点光源和物连线平分线的一簇双曲面。处于该干涉光场的全息干板上的乳胶层感光。显影后析出银颗粒，形成具有反射性能得小反射镜群。若用于点光源方向相同的光照射此全息图时，反射光的反向延长线汇聚点为物体的虚像；用方向相反的光照射时，反射光汇聚点用毛玻璃屏接收物体的实像。

实际光路图如左。半导体激光器发出激光束，通过分束镜 BS 一分为二，其中透射束经反射镜 M1 反射后，用扩束镜 L1 将光束扩大后照射到被摄物体上，经物体表面反射后照射到全息干板上，为物光；另一束光经反射镜 M2 反射、L2 扩束后，直接照射到全息干板，为参考光。为保证图像清晰，必须使两束光光程大致相等、且两束光射到干板上的夹角在 30° 左右。



复振幅表达式：

设入射光、参考光在全息干板上的电场分布为：

$$E_o(r) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{E_i}{r_i} \cos\left(\omega t + \varphi_i - \frac{2\pi r_i}{\lambda}\right) \quad E_R(r_R) = E_{R_0} \cos\left(\omega t + \varphi_{r_R} - \frac{2\pi r_R}{\lambda}\right)$$

两者相干叠加，故干板上的总光场 $E_H = E_o(r) + E_R(r_R)$ ，总光强 $I = (E_o + E_R)(E_o^* + E_R^*) = E_o E_o^* + E_R E_R^* + E_o E_R^* + E_R E_o^*$

经曝光后得干板经过线性处理（显影、定影）后，全息干板透过率函数 T 与曝光光强成线性关系，即

$$T = \alpha + \beta I_H = \alpha + \beta(E_o E_o^* + E_R E_R^* + E_o E_R^* + E_R E_o^*)$$

其中 α 、 β 是由干板性质确定的常数。

设再现光波的复振幅为 $c(x, y)$ ，从全息图透过的光的振幅为 $cT = c\alpha + c\beta(E_o^2 + E_R^2) + c\beta E_o E_R^* + c\beta E_R E_o^*$ ，其中第一第二项为常数，即直射光。第三项与 a 成正比，即与物光光波相同，称为原始像。第四项与 a 的共轭量成正比，称为共轭像，即在虚像相反的一侧形成一共轭实像。

2. 反射式

在记录全息图时，物光和参考光位于记录介质的两侧，再现像是由照明全息图的反射光形成的，这种全息叫做透射式全息图。

常见的反射全息图是白光再现全息图。光路图如左。激光经透镜 L 扩束后入射到全息干板的乳胶层，为参考光；扩束光穿过乳胶层后照射到物体上，再由物体反射到乳胶层，为物光。

物光、参考光夹角接近 180° ，发生干涉后在乳胶层内形成的感光双曲面簇基本平行于乳胶层，各面间隔近似等于 $\lambda/2$ 。教学使用的全息干板乳胶层厚度为 $6 \sim 12 \mu m$ ，由此可知在乳胶层内就有几十个反射银层，故该全息图为一三维结构的衍射物体。

由此衍射物体产生的衍射光的极大值必须满足的布拉格条件：

1) 反射镜等于入射角，即每一银层衍射极大值都沿反射方向；

2) 由相邻两反射银层反射的光的光程差必须满足 $\Delta\delta = 2d \cos i = \lambda$, d 为相邻二银层的间隔, i 为反射(入射)角。

再现时，照明白光从与参考光相同的角度 i 入射全息图，根据布拉格条件，只有波长 $\lambda = 2d \cos i$ 的光才有衍射极大值。可知此像一定是单色像。

拍摄系统应具备的条件：

1. 光源为相干光源

2. 全息照相系统具有稳定性

全息底片记录的是物光与参考光的干涉条纹，又细又密，微小扰动会导致干涉条纹变模糊。故拍摄过程所有光学器件需要固定在磁性底座上；另外气流、声波、温度变化会引起周围空气密度变化，导致振动，因此曝光过程中禁止大声喧哗、随意走动。

3. 物光与参考光应满足：

两束光光程尽量相等，最多不超过2cm；两束光夹角在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 之间， 30° 左右最好。

根据干涉原理，干板上干涉条纹的间距 d 与光源波长 λ 及参考光和物光之间夹角 θ 关系为 $d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}}$

干板分辨率 η 与干涉条纹的间距 d 关系为 $\eta = \frac{1}{d} = \frac{2 \sin \frac{\theta}{2}}{\lambda}$

可以看出，参考光和物光之间夹角越大，干涉条纹越细，对干板分辨率要求越高，故夹角不能过大。而夹角对全息图再现像时的观察窗(视角)有影响，夹角大可在较大范围内从不同角度观察物象，故夹角不能过小。

照射到底片上的物体反射的物光与参考光的光强比一般要求在1:3~1:10之间。

4. 用高分辨率的干板

5. 曝光与显影对实验结果的影响：

若曝光时间过短，底板上条纹太浅，复杂的衍射光栅无法形成。若时间过长，底板过黑，光线透过率过低，且保持系统稳定性更难，突然的扰动会导致拍摄失败。

6. 冲洗过程要求：

首先按照配方要求用蒸馏水配制显影液、定影液和漂液，冲洗过程需要在暗室进行，干板在定影完成前不可见光。此外，干板一般保持在室温 20°C 左右进行冲洗。

7. 显影、定影时长：

若显影时间不足，干涉条纹不明显，再现时衍射难以实现；若时间过长，干涉条纹或毕竟颜色太深，透光太弱，再现时衍射难以实现。若定影时间不足，干涉条纹在再现光照射下会退化。

实验内容

1. 拍摄玩偶的透射全息图

2. 冲洗底片

3. 用扩束激光再现全息像，观察玩偶的虚像，并用毛玻璃接收玩偶的实像。

实验步骤

1. 光路调节

要求：等高同轴，参考光、物光光程差小于1cm，两束光到干板的夹角 $< 30^\circ$ ，物光强于参考光。加扩束镜，光束尽量刚好照满底片和物体。加电子定时器（快门），尝试开启，能正常运作。注意：调好光路后，要及时将各器件锁住。

2. 全息照片的拍摄

1) 将显影液、定影液分别倒入相应的盆中；

- 2) 打开观察用绿灯（强度不要太大）；
- 3) 关闭照明灯，取下废底片，安装干板，乳胶层朝向光线入射方向；
- 4) 消振及拍摄需各组同步，消振 4 分钟，曝光 3 秒左右。
- 5) 每人拍摄一次，不重拍。

3. 冲洗照片

- 1) 显影时间看底片变浅棕色即可停显，清水冲洗 30 秒；
- 2) 定影 5-10 分钟，清水冲洗 2 分钟；
- 3) 烘干。烘干机功率不要开最大。

4. 虚像再现

照片放回原处，取下被摄物，透过照片，向原被摄物方向观察，应见被摄物虚像。

5. 电子定时器的使用

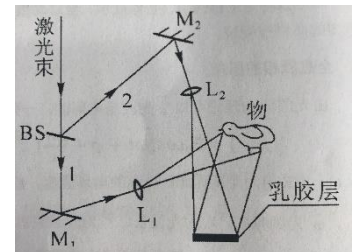
- 1) 按盒盖提示操作设置参数；
- 2) 注意曝光器禁止快速连按启动开关，避免快门卡住。

注意事项

- 1、眼睛安全：严禁直视激光器！
- 2、仪器安全：禁止手摸玻璃仪器表面。
- 3、冲洗完毕药液倒回原瓶，不可倒错，混合。
- 4、清洗装药液盘子，整理台面。

思考题

1. 全息照相得到一个立体的单色像，而普通照相得到一歌二维的可以有不同颜色的图像。因为全息照相得到的底片具有多个银层，可以再现出被摄物不同位置的样子。
2. 光路图如右图。调节两束光光程尽量相等，最多不超过2cm；两束光夹角在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 之间， 30° 左右最好。照射到底片上的物体反射的物光与参考光的光强比一般要求在1:3~1:10之间。物与底片距离小于10cm。



3. 拍摄过程：注意曝光时长。

冲洗过程：在暗室进行，保持室温 20°C 。

4. 得到一个三维立体的像。
5. 可以做舞台投影、交通管理、文物展出。
6. 不知道……
7. 舞台投影、交通管理、文物展出等等