

设计性全息术实验（1319 实验室）

三维全息实验要求预习三维全息、白光全息两项实验

实验要求：

实验前准备

认真预习

- (1) 认真阅读实验讲义或实验教材
- (2) 完成在线预习测试或准备预习报告

注明：1、注重对实验原理的理解；2、上实验课之前必须完成在线预习测试；
3、认真预习者方可进入实验室进行操作

准时进入实验室

- (1) 不准迟到，请假需要提前上交书面申请
- (2) 注意保持实验室卫生
- (3) 严禁携带零食，**注重仪表**！例如：不穿拖鞋等行为

仔细阅读听讲

- (1) 认真听讲每个仪器的名称，作用及使用方法
- (2) 阅读实验指导书

实验进行时

- 严肃认真，不得在实验室内打闹、嬉戏！
- 严格遵守操作规程，严禁手碰反射镜、透镜等光学仪器的光学面
- **注意安全！不得直视激光，以免损伤视网膜！**
- 严禁损坏仪器 经指导老师签字或同意后，并清洁整理完毕方可离开！

实事求是

- (1) 认真观察、分析实验现象
- (2) 如实记录实验数据，不得抄袭

勇于创新

积极思考并提出自己的建议或意见

实验结束后

及时认真完成调研报告（最新全息光学科研进展的文章）！（3 页纸以下，列出题目、摘要、引言、实验、结果与讨论、结论、参考文献、回答思考题）

实验完成后，下次上课时必须交上，不得延误！

人眼看到物体是由于光波到达人眼，本身发光或间接发光（反射、散射光）的物体都可以被人眼观察到。根据到达光波的强弱、颜色和方向，人眼可以识别不同的物体，物光波的主要特征是波长（颜色）、振幅（光强）和相位（物点的位置）。全息照相术是利用干涉和衍射的原理将物体发射的光波以干涉条纹的形式记录下来，再在一定的条件下再现，形成与原物体完全相似的空间像。由于它记录的是物体原来光波的全部信息（振幅和位相），像十分逼真并具有立体效果，所以称做全息照相或全息术。它与普通照相（只记录了光波的振幅）效果完全不同。

全息术是由英国科学家丹尼斯·伽博（Dennis Gabor）在 1947 年提出的，并于 1971 年荣获诺贝尔物理学奖。1960 年激光的出现，具备了相干性良好且亮度高的光源，使全息照相由理论变成了现实，全息照相技术研究才逐渐引起科学界的重视。1962 年利思（Leith）和厄帕特尼克斯（Uptnieks）提出了离轴全息图，从此全息术进入全面发展阶段，成为光学的重要分支，并在许多方面有了广泛的应用。时至今日，全息技术已由全息照相发展为彩虹全息、周视全息、全息放大、全息显微等许多全新的技术，成为科学技术上一个崭新的领域。

实验目的：

- (1): 初步了解全息术的基本原理，学习并掌握全息术基本实验技术和方法，
- (2): 制作全息光栅和拍摄物体的三维全息图，
- (3): 观察和分析全息照相的成像特性，了解再现物像全息的性质和方法。

实验原理

普通照相技术是利用几何光学中的透镜成像原理，在底片上记录的是被摄物体上各点的光强信息（即物光的波长和振幅），在相纸上显示的是直观的被摄物体的二维平面图像，丧失了物体的三维特征。全息图种类很多，有菲涅耳全息图、夫琅禾费全息图、傅立叶变换全息图、彩虹全息图、像全息图、体积全息图等。不管哪种全息图都要分成两步来完成：第一步，干涉法记录全息图，即波前记录；第二步，用全息图使原光波波前再现，即波前再现。

1、波前记录

由于所有的记录介质只能对光强有响应，因此普通照相机利用直接成像的方法，只能记录下光波的振幅信息，为了记录物体发射光波的相位信息，人们自然想到利用光的干涉效应。因此在拍摄全息图时除了物光波外还必须有一束参考光波，这两束光波应当具有良好的相干性，以便记录下清晰的干涉条纹。图 1 是一般拍摄离轴全息图（也称作菲涅耳全息图）的光路图。为了说明全息图的形成过程，我们只取物体上的某一个发光点 O ，并取全息干板平面为 O_{xy} 坐标平面，如图 2 所示，设物点 O 的坐标和参考光点 R 的坐标分别为 (x_0, y_0, z_0) 和 (x_R, y_R, z_R) ，则 O_{xy} 平面上物光的复振幅分布为

$$O(x, y) = O_0(x, y) \exp[j\Phi_0(x, y)] \quad (1)$$

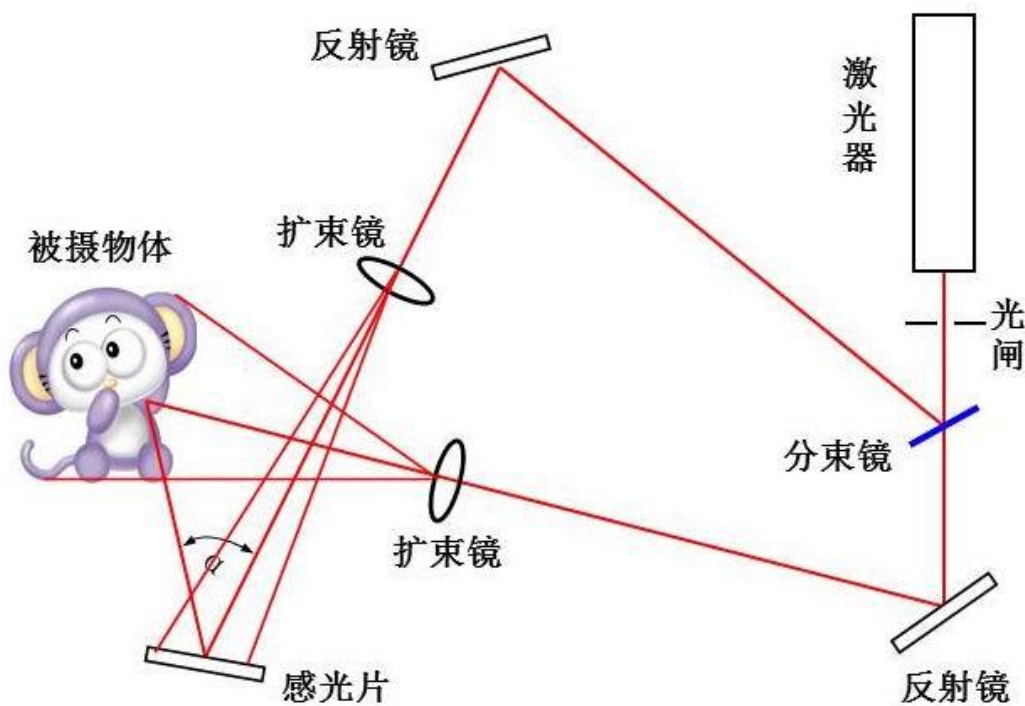


图 1 三维全息光路图

在 O_{xy} 平面上参考光的复振幅分布为

$$R(x, y) = R_0(x, y) \exp[j\Phi_R(x, y)] \quad (2)$$

由于物光束 O 和参考光束 R 系相干光束，所以全息底板上的光强是它们合振幅的平方，即：

$$\begin{aligned} I(x, y) &= [O_0(x, y) + R_0(x, y)]^2 \\ &= A_O^2 + A_R^2 + A_O A_R e^{i(\phi_O - \phi_R)} + A_O A_R e^{i(\phi_R - \phi_O)} \\ &= A_O^2 + A_R^2 + 2A_O A_R \cos(\phi_O - \phi_R) \end{aligned} \quad (3)$$

上式右边的三项中，第一项反映了照射在底板上的物光光强，它在底板上不同的位置有不同的大小。第二项反映了照射在底板上的参考光光强，由于参考光分布均匀，所以参考光在底板上构成了均匀的背景。第三项是物光和参考光的相干项，它反映了两束光的振幅和相对相位的关系，即通过不同光强的干涉条纹把物光的位相信息记录在底板上。

可见，底板上记录的并不是物体的几何图形，而是一组记录着物光振幅和相位全部信息的不规则干涉图样，图样上的明暗对比程度反映了物光相对参考光强度（振幅）的变化，图样的形状和疏密变化反映了物光和参考光之间的相位变化。且底板上任一点的光强都是到达该点的整个物光光波与到达该点的参考光波干涉的结果，所以底板上的任何一个小部分都记录着所有物点的信息，通过底板上干涉图样上的任何部分都能再现整个物体的像。

可用作全息记录的感光材料很多，一般最常用的是卤化银乳胶涂布的超微粒干板，称为全息干板，按图 1 拍摄的全息图也叫做平面全息图，可以用振幅透射率来表示其特性，一般是一个复函数，具有下面的形式：

$$\tau_H(x, y) = \tau_0(x, y) \exp[j\Psi(x, y)] \quad (4)$$

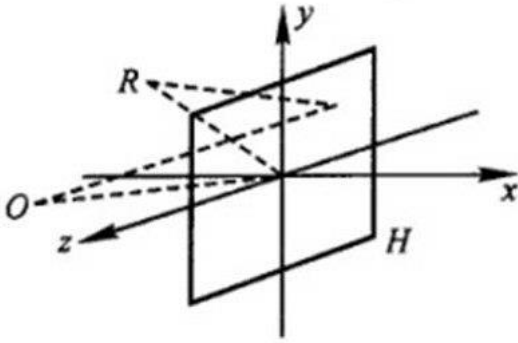


图 2：全息图的形成

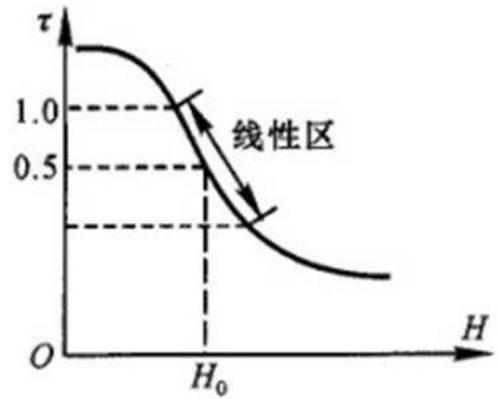


图 3： τ - H 曲线

在上式中如果 ψ 与 (x, y) 无关，是一个常数，就称为振幅型全息图。如果 τ_0 与 (x, y) 无关，是一个常数，就称为相位型全息图。如果两者都与 (x, y) 有关，就称为混合性全息图。全息照相干板的特性可以用图 3 所示的 τ - H 曲线来表示。其中 τ 为振幅透射系数， H 为曝光量。因为 τ - H 曲线只在中间一段近似为直线，所以对于不同的曝光量（光强与曝光时间的乘积），可以完成不同的记录——线性记录和非线性记录。一般记录时取曝光量在 H_0 的位置。并控制参考光、物光光强比为 2 比 1 至 10 比 1 的范围。这样就可以实现线性记录。在线性记录的条件下，

$$\tau_H = \beta_0 + \beta H = \beta_0 + \beta I t \quad (5)$$

t 为曝光时间， I 为总光强， β_0 和 β 为常数。 B 等于图 3 中线性区的斜率，将公式 (3) 中的光强表达式代入，得到拍好的全息图的复振幅透射率

$$\tau_H = \beta_0 + \beta t [O_0^2 + R_0^2 + 2O_0R_0 \cos(\Phi_0 - \Phi_R)] \quad (6)$$

2、波前再现

拍摄好的全息底板，经过适当的显影、定影和漂白处理后，将得到一个透光率各点不同的全息片，片上各点的振幅透射率 T （透射光复振幅/入射光复振幅）与入射光强 I 之间成如下线性关系

$$\begin{aligned} T(x, y) &= T_0(x, y) + KI(x, y) \\ &= T_0(x, y) + K(A_0^2 + A_R^2) + KA_0A_R e^{i(\phi_0 - \phi_R)} + KA_0A_R e^{i(\phi_R - \phi_0)} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $T_o(x, y)$ 为底版上没曝光部分的透射率, K 为小于零的比例系数。

当以原参考光为再现光照射全息片时, 透射光波为:

$$\begin{aligned} U'(x, y) &= R_o(x, y) T(x, y) \\ &= [T_o(x, y) + K(A_o^2 + A_R^2)] A_R e^{i\phi_R} + K A_o A_R^2 e^{i\phi_o} + K A_o A_R^2 e^{i(2\phi_R - \phi_o)} \end{aligned} \quad (8)$$

上式表明透射光包含三部分:

第一项 $[T_o(x, y) + K(A_o^2 + A_R^2)] A_R e^{i\phi_R}$ 是强度按一定比例衰减的直接透射光, 其传播方向保持不变, 属于光栅的零级衍射。

第二项 $K A_o A_R^2 e^{i\phi_o}$ 除振幅大小改变外, 其形式与物光 O_o 的振动方程相同, 说明这束光是按一定比例重建的物光波, 属于光栅的正一级衍射波。根据基尔霍夫衍射原理可知, 这束发散的正一级衍射波因其振幅和位相分布规律与原始物光波完全相同, 它将 (在物体原来的位置上) 形成与原物体十分逼真的三维立体虚像, 当从不同角度去观察时, 能看到物体的不同侧面。

第三项 $K A_o A_R^2 e^{i(2\phi_R - \phi_o)}$ 与物光波的共轭光波有关, 是光栅衍射形成的负一级会聚衍射波, 它意味着在虚像的相反一侧将会聚成一个前后关系与实物相反的共轭实像。根据再现过程中再现像的横向和纵向放大规律可知, 有些情况下负一级会聚衍射波形成的是发生畸变的共轭实像。

上述表明, 全息照相具有以下显著特点:

- 1、全息图具有光栅结构, 经其衍射的成像光束分为发散和会聚两支, 致使物体的原始虚像与共轭实像共存。
- 2、再现像是形象逼真的三维立体图像, 具有明显的视差和纵深视差效应。
- 3、全息照片上每一处都记录了物体上所有物点发出的光信息, 因此, 一张破碎的全息残片仍能完整的再现出物体的全貌, 只是分辨率受些影响。

实验器材

防震实验台, 氦氖激光器 (632.8 nm), 半导体激光器 (650 nm), 扩束透镜, 分束镜 (30%, 50%; 95%), 平面全反镜(两片), 白板, 毛玻璃屏, 二维调整架, 磁性表座, 磁性直尺, 钢尺, 量角器, 曝光计时器, 干板架, 全息干板, 照相冲洗设备及药品

实验内容

1、三维全息

如图 1 所示, 在防震平台上布置光路。分束镜采用反射率为 5% 或 30% 的平晶 (两面互相倾斜而且较厚)。选择漫反射性能较好的物体作为拍摄三维全息照相的物体。调好光路, 使参考光与物光束的光强比为 1:2 到 1:10, 打开快门定时, 将白板取下, 换上全息干板 (注意遮光), 然后开始

曝光。曝光时间一般取 6~15s 左右，曝光时注意不要碰台面以免产生震动。曝光后经适当冲洗，显影时间与定影时间可根据室温和显影液与定影液的浓度相应调整，即得到三维全息图。就完成了波前记录的任务。待全息干板完全干燥后，就可以放入原光路中进行再现。

再现的方法是将干板放在原光路中，在拍摄三维全息时把 5% 或 30% 分束镜换成平面全反射镜，拿走物体，向着干板后原物体所在的方向看去就可以看到与原物体相似的明亮的像。

白光全息：

全息照相发展到现在可分为四个阶段：第一阶段是用水银灯记录同轴全息图，这时是全息照相的萌芽时期，主要原因是没有好的相干光源，再现像和共轭像不能分离；第二阶段是用激光记录、激光再现的全息照相，能够把原始像和共轭像分离；第三阶段是激光记录、白光再现的全息照相，主要有透射全息、反射全息、彩虹全息等；第四阶段是当前所致力方向，就是白光记录全息图。

尽管全息种类很多，但记录均是利用物光波和参考光波发生干涉时，在全息图附近的形成三维条纹。当薄膜厚度小于干涉条纹间距时，我们就把记录的全息图完全作为一种二维图像来处理，这种类型的全息图称之为平面全息图；而当记录材料的厚度是条纹间距若干倍时，则在记录材料体积内将记录下干涉条纹的空间三维分布，这样就形成体积全息（体全息）。

实验原理

体积全息图对于照明光波的衍射作用如同三维光栅的衍射一样。按物光和参考光入射方向和再现方式的不同，体积全息可分为两种。一种是当物光和参考光在记录介质的同一侧入射，得到透射全息图，再现时由照明光的透射光成像。另一种是物光和参考光从记录介质的两侧入射，得到反射体积全息图，再现时由照明光的反射光成像。

体积全息照相记录过程中也是利用物光和参考光的相干光束进行叠加。现以反射式全息为例说明。物光和参考光分别从记录介质的两侧入射，两束光之间的夹角接近于 180° 。因而，在全息记录介质内可建立起驻波，这样形成的干涉条纹接近平行于记录介质的表面。这些干涉条纹实际上是一些平面，垂直于光波传播方向，即形成了三维分布的空间立体光栅。用图 2 可以说明干涉条纹的形成。参考光和物光以接近 180° 的夹角入射到干板的乳胶层上。为简便分析，假设参考光和物光均为平面波且与乳胶面的法线构成相同的倾角。从图中可以看到，一系列相继等相位波前穿过乳胶层，两列波的波阵面相交的轨迹为一平面，在这个平面上均为干涉最大。干板的乳胶层被曝光后，经过处理，原物光的全部信息就被记录在这些

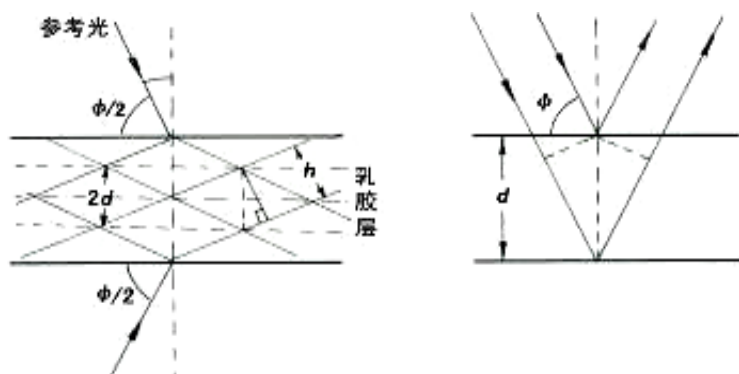


图2 干涉条纹的形成示意图

复杂的干涉条纹层上, 当用一束参考平面波(某一角度)照射处理好的全息图时, 通过这些布喇格平面的局部反射作用就可以再现出一束原始物波, 即再现出物体的原始信息。当照明光是白光时, 白光中只有和记录时波长相等的光满足布喇格衍射条件, 其余的光只能透过乳胶层或部分被吸收。此时三维光栅的衍射等效于各乳胶层反射光束的相干迭加, 只有入射光线与乳胶层的夹角 φ 和波长 λ 满足布喇格公式 $2d\sin\varphi = \lambda$ 时才存在干涉极大, 而且相对于乳胶层而言, 干涉极大的方向正好是入射光经乳胶层反射后的方向。不难发现这时干涉极大的方向正好是制作全息片时物光束的方向。因此在反射方向上, 得到的正是重建的物光束, 在此方向可以看到原物的三维虚像。由于三维光栅衍射的这种波长选择性, 我们不必用原来的参考光作为再照光, 而可以用白光照射重建原来的物光波, 如图(2) 所示。如果把图(2)中的乳胶面转过 180° 可以得到三维实像, 如图(3) 所示。在实际显影、脱水、干燥的过程中, 乳胶会发生收缩, 乳胶层平面间距会缩小, 因而再显像的色彩会向短波方向移动。

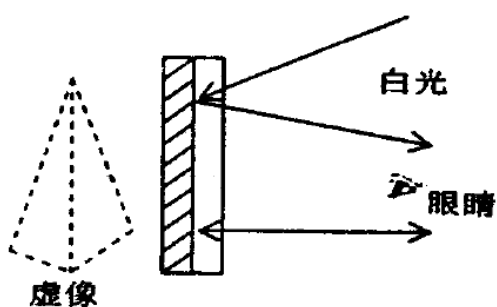


图2 白光照射重建光路示意图

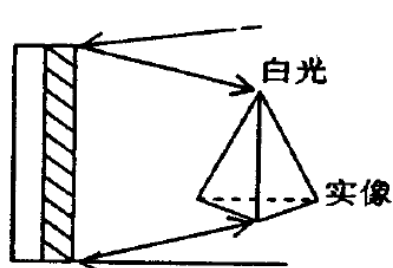


图3 乳胶面转过 180° 可以得到三维实像光路示意图

实验仪器

650nm 激光器 (40mw)、曝光计时器、扩束镜、干板架、载物台、小物体、白板、二维调整架、磁性表座

红敏光致聚合物全息干板性能指标

RSP-1 型红敏光致聚合物全息干板是一种位相型记录介质, 它不同于银盐干板, 属于有机聚合

的非银盐感光材料。它的性能有以下几个指标：

- 1、对波长 $\lambda = 632.8\text{nm}$ 、 647.1nm 的红光敏感。
- 2、衍射效率高， $>80\%$ 。
- 3、感光灵敏度 $5\sim 10\text{mJ}/\text{cm}^2$
- 4、折射率调制度 $\Delta n=0.0089$
- 5、分辨率， >4000 条/mm
- 6、光谱吸收曲线（如图 4 所示）

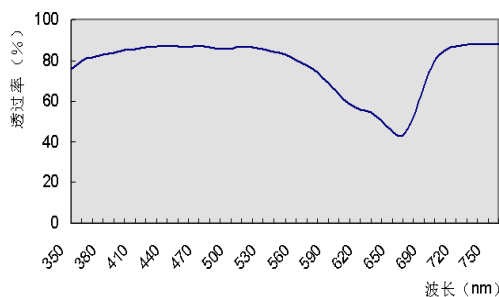


图 4 聚合物干板吸收曲线

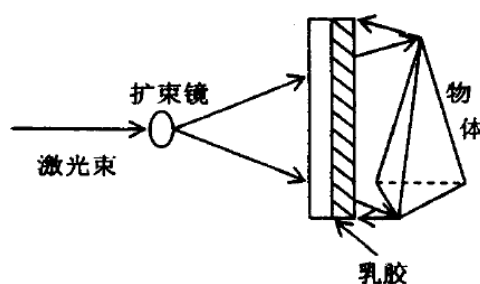


图 5 白光全息光路图

该干板吸收谱线对红光部分存在峰值，在可见光区蓝绿光吸收很小。

- 7、干板厚度 $d=25\ \mu$

（四）实验步骤：

- （1）按图5的光路布置光学元件，调节光学元件的螺钉，使通光中心基本等高。
- （2）放置干板处用白板代替，调节扩束镜的位置，使扩束后的光束均匀照在白板上，调整物体，使反射光束能够完全照在白板上。
- （3）曝光 调好光路后，打开曝光定时器，选择预定的曝光时间（按底版特性要求和激光强度选定曝光量），选定合适的曝光时间（实验室给参考值），让曝光定时器遮光，取下底版夹上的白板，装上底版（乳胶面面向物体），稳定1分钟后，打开曝光定时器，进行曝光。待光开关自动关闭后，取下底版后，进行下面的脱水、干燥等过程。
- （4）曝光后干板的处理方法
 - 1) 在蒸馏水中静置 10~30 秒。
 - 2) 在浓度为 40%的异丙醇中脱水 60 秒。
 - 3) 在浓度为 60%的异丙醇中脱水 60 秒。
 - 4) 在浓度为 80%的异丙醇中脱水 15 秒。
 - 5) 在浓度为 100%的异丙醇中脱水，直至出现清晰、明亮的红色或黄绿色图像为止。
 - 6) 取出干板，迅速用吹风机快速吹干直到全息图重现像变为金黄色清晰、明亮图像为止（对反射全息图）。
 - 7) 封装：用干净的玻璃片（比如洗净的废干板）覆盖全息干板感光层面，再用市售密封胶密封，室温固化后即得一块永久性保存的全息图或全息工艺品。

注意事项:

- 保持各光学元件清洁,切勿用手或手帕擦拭!
- 曝光前一定要稳定一段时间,曝光过程中切勿触及全息实验台!
- 注意安全,绝对不允许用眼睛直视未扩束或聚焦的激光束,防止视网膜损伤!
- 全息底片为玻璃片基,暗室中进行操作,应小心轻放,防止划伤!



国家级实验教学示范中心

中国科学技术大学物理实验教学中心

中华人民共和国教育部