

# 激光原理与技术

## 激光全息照相

丁铭

[mingding@buaa.edu.cn](mailto:mingding@buaa.edu.cn)

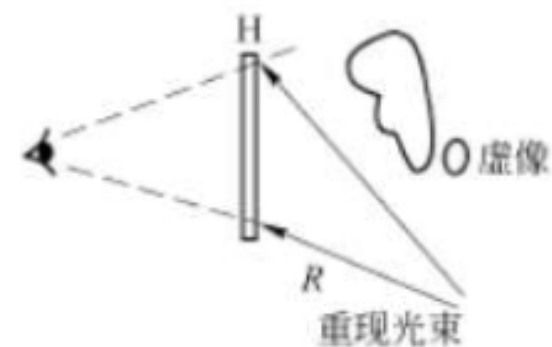
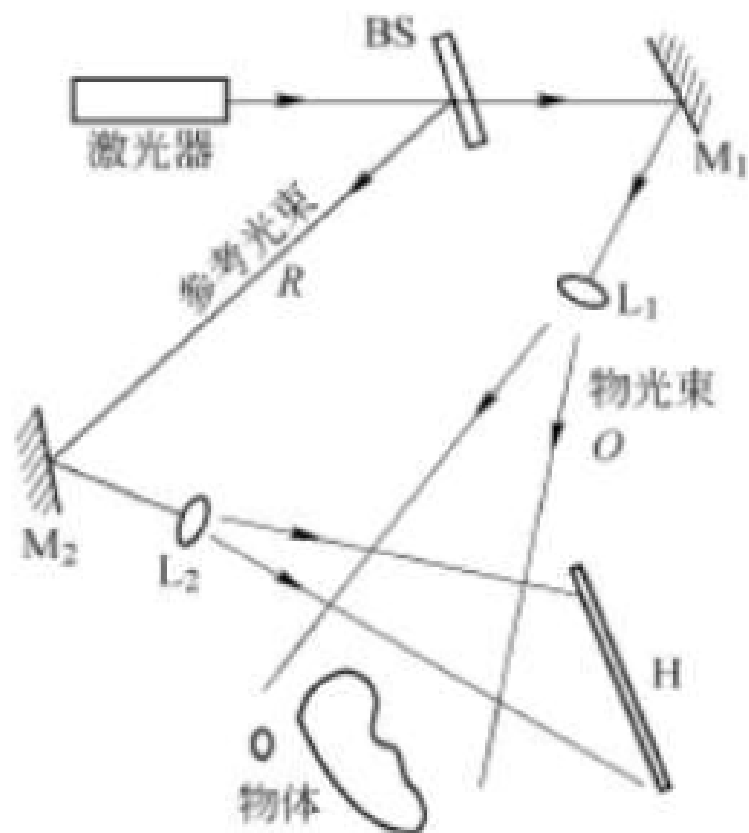
早在1948年，英籍物理学家D. Gabor就根据光的干涉和衍射原理，提出了重现波前的全息照相理论，12年后激光器问世，接着E. Leith和J. Upantnieks就用激光拍摄完成了完善的全息照片，在一张平面全息图底片的后面重现出与原物逼真的三维形象，令人赞叹不已。50多年来，全息照相已成为信息光学中最活跃的领域之一。尤其是近20多年来，模压全息技术的发展使全息产品走向产业化，并深入到人们的日常生活中。

第五章简要介绍全息照相的基本原理及其应用。

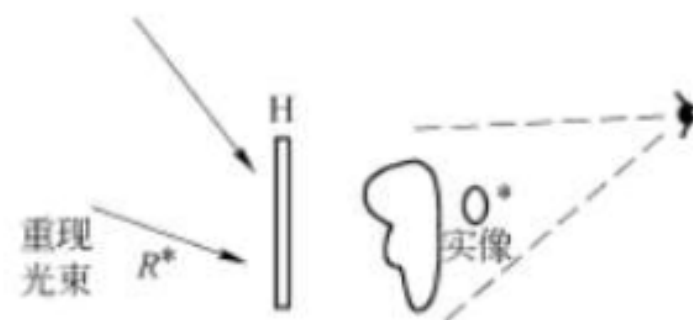
# 第一讲 全息照相基本原理

## 一. 全息图的记录和重现

普通照相采用几何光学成像方法，记录的是物光强度分布；**全息照相**采用的是物理光学的干涉、衍射原理，记录的是干涉条纹。全息照相过程分为**记录**和**重现**两个步骤。



(a) 虚像



(b) 实像

图5.1.1 全息图的记录（左图）与重现（右图）

## 记录与重现数学分析

**记录：** 设 
$$\begin{cases} O(r, t) = A_0(r) e^{i(\varphi_0 - \omega t)} & \text{(物光)} \\ R(r, t) = A_R(r) e^{i(\varphi_R - \omega t)} & \text{(参考光)} \end{cases}$$

则其合振幅 
$$\begin{aligned} A(r, t) &= O(r, t) + R(r, t) \\ &= A_0(r) e^{i(\varphi_0 - \omega t)} + A_R(r) e^{i(\varphi_R - \omega t)} \end{aligned}$$

光强度 
$$\begin{aligned} I(r, t) &= \langle A(r, t) A^*(r, t) \rangle = |O|^2 + |R|^2 + R^* O + R O^* \\ &= |O|^2 + |R|^2 + 2|O||R| \cos(\varphi_0 - \varphi_R) \end{aligned} \quad (5.1.4)$$

其中第三项代表两个波之间的干涉效应，受余弦调制产生条纹。底片经曝光、显影、定影处理后获得干涉图样，其条纹对比度：

$$V = \frac{2 |O| |R|}{|O|^2 + |R|^2}$$

条纹形状由位相差  $(\phi_R - \phi_0)$  决定。因此，全息图片经曝光、显影、定影等处理后，不仅记录了关于光波的强度信息，也记录了它们的振幅和位相信息。可以想象， $(\phi_R - \phi_0)$  的空间变化不一定是线性的，也不一定是单调的，因而干涉条纹的疏密、取向、强弱和对比度都是在随处变化。但其变化决不是随机的，而是以  $\phi_R$  随空间角规则的变化为标准，把物光波的位相分在  $\phi_0$  以光强度变化的形式按公式 (5.1.4) 反映出来，而振幅则以条纹的调制深度被记录下来。



**重现：** 设全息底片工作于线性区，则经显影、定影等处理后，其振幅透过率与光强度成正比

$$\tau(x, y) = \tau_0 + \beta I(x, y), (\beta < 0)$$

当用原参考光重现时，其透射光场为

$$\begin{aligned} A_{rec} &= R(r, t) \tau(r) \\ &= R \left[ \tau_0 + \beta \left( \underset{\uparrow}{|O|^2} + |R|^2 \right) \right] + \underset{\uparrow}{\beta R R^*} O + \underset{\uparrow}{\beta R^2} O^* \end{aligned} \quad (1)$$

沿R方向的透射场      原始像      共轭像

当用共轭参考光重现时，其透射光场为

$$\begin{aligned} A_{rec} &= R^*(r, t) \tau(r) \\ &= R^* \left[ \tau_0 + \beta \left( |O|^2 + |R|^2 \right) \right] + \beta (R^*)^2 O + \beta |R|^2 O^* \end{aligned} \quad (2)$$



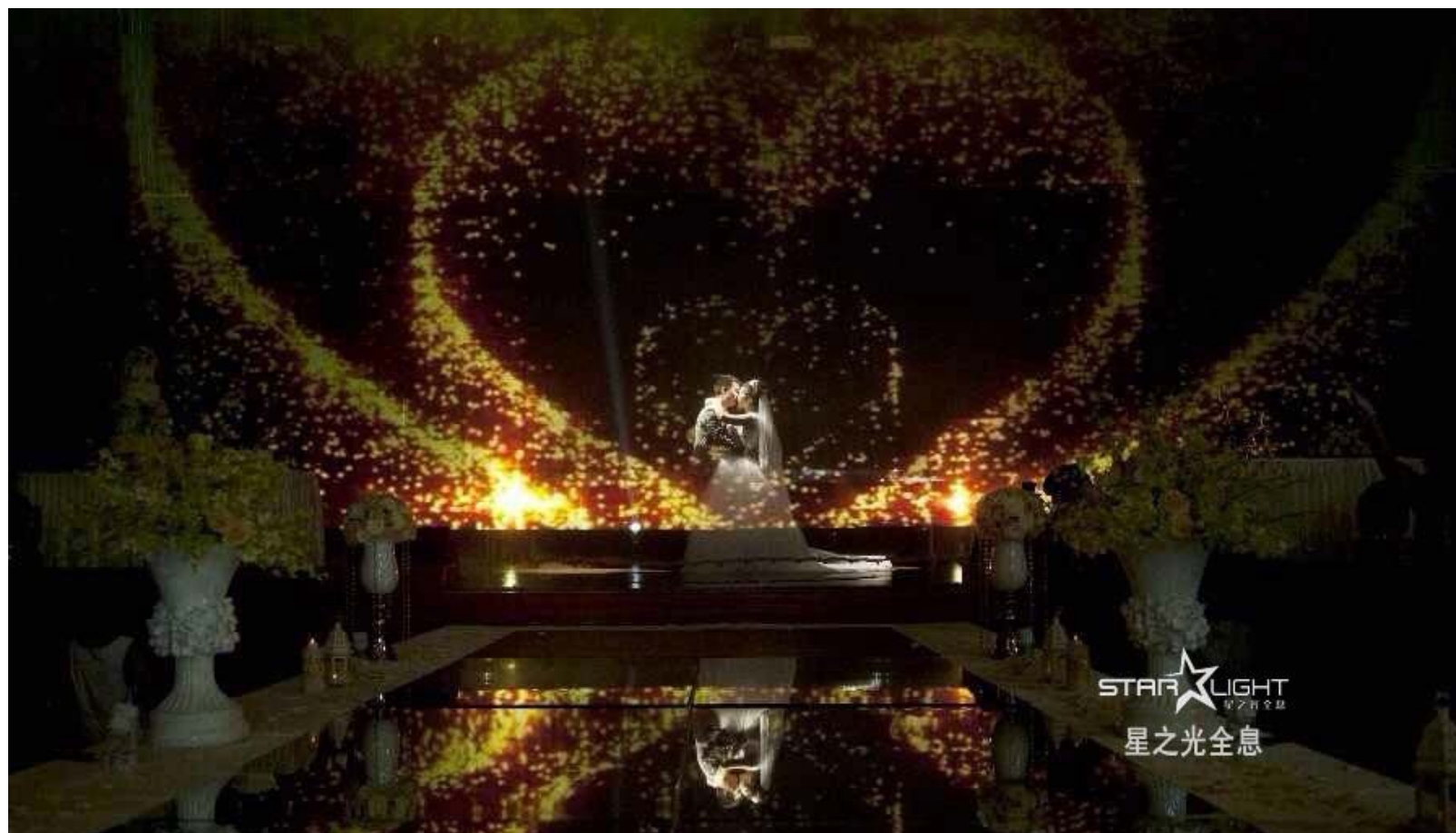
英女王全息像



菩萨全息像



全息明信片-张家界天门仙山



## 全息舞台

## 二. 全息照相的基本特点

1. 三维特性
2. 弥漫性
3. 可进行多重记录
4. 可同时获得虚像和实像



细致分析上述的特点表明：全息照片是一种全新的照片。全息照相术从根本上改进了传统的照相术，已经成为当代科学家和艺术家获取完整自然信息的一种重要手段，并显示出巨大的应用潜力。

### 三. 全息图的类型

1. 按参考光、物光是否同轴：同轴全息图和离轴全息图
2. 按全息图结构与观察方式：透射全息图与反射全息图
3. 按全息图复振幅透过率：振幅型全息图与位相型全息图；后者又分为折射率性和表面浮雕型两种



### 三. 全息图的类型

4. 按全息底片与物的距离：像面全息图，菲涅耳全息图和傅里叶变换全息图

5. 按所用重现光源分类：激光重现与白光重现

6. 按记录介质胶乳层厚度：平面全息图与体积全息图

**记录时：**采用球面波二次曲面近似，在底片上所产生的光场复振幅和光强度各为：

$$A(x, y) = O(x, y, z) + R(x, y, z)$$

$$= A_0 e^{i \frac{k_1}{2z_0} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]} + A_R e^{i \frac{k_1}{2z_R} [(x-x_R)^2 + (y-y_R)^2]}$$

$$I(x, y) = |O|^2 + |R|^2 + |R^*| |O| \exp \left\{ i \frac{k_1}{2z_0} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2] - i \frac{k_1}{2z_R} [(x-x_R)^2 + (y-y_R)^2] \right\} \\ + |R| |O^*| \exp \left\{ i \frac{k_1}{2z_R} [(x-x_R)^2 + (y-y_R)^2] - i \frac{k_1}{2z_0} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2] \right\}$$

$$k_1 = 2\pi / \lambda$$

在线记录条件下，经显影、定影后底片的振幅透过率正比于光强度，其中重要的两项：

$$\tau_3(x, y) = \beta |R^*| |O| \exp \left\{ i \frac{k_1}{2z_0} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] \right. \\ \left. - i \frac{k_1}{2z_R} [(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2] \right\}$$

$$\tau_4(x, y) = \beta |R| |O^*| \exp \left\{ i \frac{k_1}{2z_R} [(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2] \right. \\ \left. - i \frac{k_1}{2z_0} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] \right\}$$

重现时：令重现光波为由  $p(x_p, y_p, z_p)$  点发出的球面波

$$A_p(x, y) = C \exp \left\{ i \frac{k_1}{2z_p} \left[ (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 \right] \right\}$$
$$k_1 = 2\pi / \lambda_2$$

则可得透射项：

$$A_3 = A_p(x, y) \tau_3(x, y)$$
$$= \beta |R^*| |O| \exp \left\{ i \frac{k_1}{2z_0} \left[ (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right] - \right.$$
$$\left. i \frac{k_1}{2z_R} \left[ (x - x_R)^2 + (y - y_R)^2 \right] + i \frac{k_1}{2z_p} \left[ (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 \right] \right\}$$

将上式位相因子中与底片平面坐标  $(x, y)$  无关的常数位相因子合记为  $\exp(i\phi)$  ; 再将含  $x$  和  $y$  的一次项及二次项分别整理, 可重新改写成:

$$A_3(x, y) = \beta |R^*| |O| C e^{i\phi} \exp \left[ i\pi \left( \frac{1}{\lambda_1 z_0} - \frac{1}{\lambda_1 z_R} + \frac{1}{\lambda_1 z_0} \right) (x^2 + y^2) \right] \exp \left\{ -i2\pi \left[ \left( \frac{x_0}{\lambda_1 z_0} - \frac{x_R}{\lambda_1 z_R} + \frac{x_p}{\lambda_1 z_0} \right) x + \left( \frac{y_0}{\lambda_1 z_0} - \frac{y_R}{\lambda_1 z_R} + \frac{y_p}{\lambda_1 z_0} \right) y \right] \right\}$$

同理可得另一透射项：

$$A_4(x, y) = \beta |R| |O^*| C e^{i\phi} \exp \left[ i\pi \left( \frac{1}{\lambda_1 z_0} - \frac{1}{\lambda_1 z_R} + \frac{1}{\lambda_1 z_0} \right) (x^2 + y^2) \right] \square \\ \exp \left\{ -i2\pi \left[ \left( \frac{x_0}{\lambda_1 z_0} - \frac{x_R}{\lambda_1 z_R} + \frac{x_p}{\lambda_1 z_0} \right) x + \left( \frac{y_0}{\lambda_1 z_0} - \frac{y_R}{\lambda_1 z_R} + \frac{y_p}{\lambda_1 z_0} \right) y \right] \right\}$$

而一个由像点发散的球面波，在近轴条件下可写成：

$$A_4(x, y) = |O_1| \exp \left\{ i \frac{k_2}{2 z_1} \left[ (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \right] \right\} \\ = |O_1| \exp(i\phi) \exp \left[ i \frac{\pi}{\lambda_2 z_1} (x^2 + y^2) \right] \square \exp \left[ -i \frac{\pi}{\lambda_2 z_1} (xx_1 + yy_1) \right]$$

采用比较系数法，对一次项、二次项分别整理，最后求得物像关系：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{z_i} = \frac{1}{z_p} \pm \mu \left( \frac{1}{z_0} - \frac{1}{z_R} \right) \end{array} \right. \quad (5.2.9a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x_i}{z_i} = \frac{x_p}{z_p} \pm \mu \left( \frac{x_0}{z_0} - \frac{x_R}{z_R} \right) \end{array} \right. \quad (5.2.9b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{y_i}{z_i} = \frac{y_0}{z_p} \pm \mu \left( \frac{y_0}{z_0} - \frac{y_R}{z_R} \right) \end{array} \right. \quad (5.2.9c)$$

式中  $\mu = \lambda_1 / \lambda_2$

由此，可确定像点坐标如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} y_i = \frac{z_i}{z_p} y_p \pm \mu \left( \frac{z_i}{z_0} y_0 - \frac{z_i}{z_R} y_R \right) \\ x_i = \frac{z_i}{z_p} x_p \pm \mu \left( \frac{z_i}{z_0} x_0 - \frac{z_i}{z_R} x_R \right) \\ y_i = \frac{z_i}{z_p} y_p \pm \mu \left( \frac{z_i}{z_0} y_0 - \frac{z_i}{z_R} y_R \right) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (5.2.10a) \\ (5.2.10b) \\ (5.2.10c) \end{array}$$

当  $z_i$  为正时，重现现象是虚像，位于  $z_i$  全息图左侧；当为负时，重现现象是实像，位于全息图右侧。



像的横向放大率  $M = \left| \frac{dx_i}{dx_0} \right| = \left| \frac{dy_i}{dy_0} \right| = \mu \left| \frac{z_i}{z_0} \right| = \left| 1 - \frac{z_0}{z_g} \pm \frac{z_0}{\mu z_g} \right|^{-1}$

像的纵向放大率  $\alpha = \left| \frac{dz_i}{dz_0} \right| = M^2 / \mu$

纵向放大率  $\alpha$  描述物面与像面之间深度反转性质。

对原始  $\alpha > 0$ ，重现现象与原物形状凹凸一致；

对原始  $\alpha < 0$ ，重现现象与原物形状凹凸互易。

由式 (5.2.9a) 与普通透镜的物像关系相比较，有

$$\pm \mu \left( \frac{1}{z_0} - \frac{1}{z_R} \right) = \frac{1}{f'} \rightarrow \pm \frac{z_R z_0}{\mu (z_R - z_0)}$$

表明全息图兼有透镜的作用，故能自行成像。

最后求得物像关系：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{z_i} = \frac{1}{z_p} \pm \mu \left( \frac{1}{z_0} - \frac{1}{z_R} \right) \end{array} \right. \quad (5.2.9a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x_i}{z_i} = \frac{x_p}{z_p} \pm \mu \left( \frac{x_0}{z_0} - \frac{x_R}{z_R} \right) \end{array} \right. \quad (5.2.9b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{y_i}{z_i} = \frac{y_0}{z_p} \pm \mu \left( \frac{y_0}{z_0} - \frac{y_R}{z_R} \right) \end{array} \right. \quad (5.2.9c)$$

式中  $\mu = \lambda_1 / \lambda_2$

$$2.A_p = R^*, \lambda_1, \lambda_2 (x_p = x_R, y_p = y_R, z_p = -z_R)$$

$$A_3 \begin{cases} z_{i1} = \frac{z_R z_0}{z_R - 2z_0} \\ x_{i1} = \frac{z_R z_0 - 2z_0 x_R}{z_R - 2z_0} \\ y_{i1} = \frac{z_R z_0 - 2z_0 y_R}{z_R - 2z_0} \end{cases} \quad A_4 \begin{cases} z_{i2} = -z_0 \\ x_{i2} = x_0 \\ y_{i2} = y_0 \end{cases}$$

分量  $A_4$  产生实像，且点像与点物相对于全息图呈镜面对称，形成凹凸互易的赝视实像。分量  $A_3$  可产生虚像或实像，取决于  $z_{i1}$  的正负。

3.  $A_\rho$ 与 $R$  都是沿 $z$ 轴传播的完全一样的平面波，即

$$x_p = x_R = 0, y_p = y_R = 0, z_p = z_R = \infty, \lambda_1 = \lambda_2$$

则有：

$$z_i = \pm z_0; x_i = x_0, y_i = y_0, M = 1$$

两个像点位于全息图两侧对称位置，虚实像各一。

4. 物点与参考点源都位于 $z$ 轴上  $x_0 = x_R = 0, y_0 = y_R = 0$

$$\tau_3(x, y) = \beta |R^*| |O| \exp \left\{ i \frac{k_1}{2z_0} (x^2 + y^2) - i \frac{k_1}{2z_R} (x^2 + y^2) \right\}$$

$$\tau_4(x, y) = \beta |R| |O^*| \exp \left\{ i \frac{k_1}{2z_0} (x^2 + y^2) - i \frac{k_1}{2z_0} (x^2 + y^2) \right\}$$

这时干涉条纹是一簇同心圆（**同轴全息图**）。其重现可分为两种情况：

(1). 用轴上照明光重现  $x_p = y_p = 0$

$$z_i = \left[ \frac{1}{z_p} \pm \mu \left( \frac{1}{z_0} - \frac{1}{z_R} \right) \right]^{-1}$$

$$x_i = 0$$

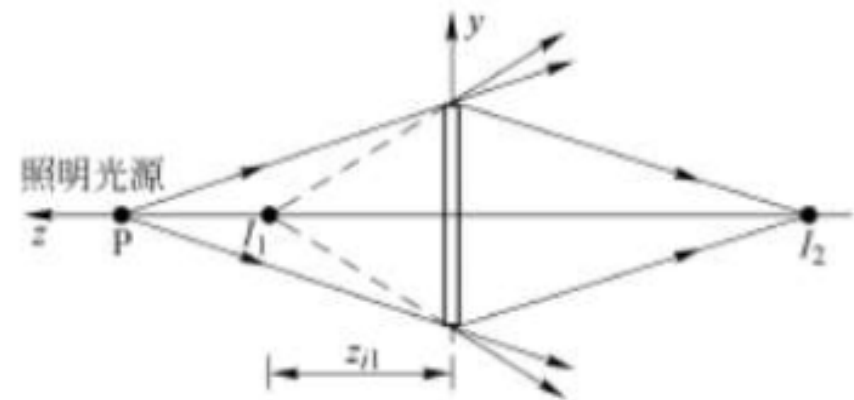
$$y_i = 0$$

两个重现像均位于Z轴上。

$$\text{当 } A_p = R \rightarrow z_{i1} = z_0 \quad z_{i2} = \frac{z_R z_0}{2z_0 - z_R}$$

$$\text{当 } A_p = R^* \rightarrow z_{i1} = \frac{z_R z_0}{2z_0 - z_R} \quad z_{i2} = -z_0$$

分量波 $A_4$ 产生一个与原始物点位置对称的实像。

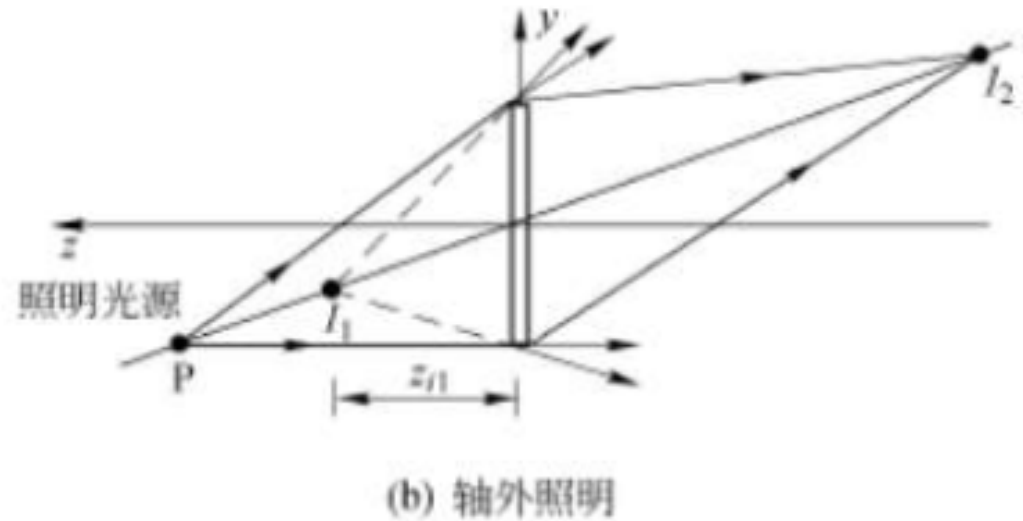


(a) 轴上照明

图5.2.4  
点源同轴全息图  
(1)

(2). 用轴外照明光重现，这时像点的坐标是：

$$\left\{ \begin{aligned} z_i &= \left[ \frac{1}{z_p} \pm \mu \left( \frac{1}{z_o} - \frac{1}{z_R} \right) \right]^{-1} \\ x_i &= \frac{z_i}{z_p} x_p \\ y_i &= \frac{z_i}{z_p} y_p \end{aligned} \right.$$



(b) 轴外照明

由于  $\frac{x_i}{y_i} = \frac{x_p}{y_p}$ ，故重现的两个像点位于通过全息图片原点的倾斜直线上。这表明：即使用轴外照明光重现，此两个像仍沿同一方位，观察时互相干扰。

课后思考：

全息照相记录与普通照相记录有什么差异？

## 第二讲 全息记录介质和实验装置



## 一、基本术语

1. 曝光量：曝光时介质表面上单位面积所接收的光能。

$$E(x, y) = I(x, y)t$$

2. 强度透射率：显影、定影后底片透过的光强度与入射光强度之比。

$$\tau_I(x, y) = \frac{I_2(x, y)}{I_1(x, y)} = e^{-2\alpha h}$$

$\alpha$  为吸收系数； $h$  为记录介质厚度

3. 光密度（黑度）：显影、定影后底片单位面积中的含银量。

$$D(x, y) = \lg(1/\tau_I(x, y)) = 2\alpha h \lg e = 0.868\alpha h$$

## 二、全息记录介质的特性

1. 灵敏度：是指记录介质在接收光能后发生光化学反应的灵敏程度。常用曝光量的倒数 $1/E(x, y)$ 来标志记录灵敏度。

各种记录介质对光谱的灵敏度是不同的。这是因为：

每一种记录介质都有一个**波长红限**，波长大于红限的光对该记录介质不能起光化学作用。

每一种记录介质也都有相应的**吸收带**，只有在吸收带内的波长方能起光化学作用。

## 二、全息记录介质的特性

2. 衍射效率  $\eta$ ：定义为全息图衍射成像的光通量与重现用照明的总光通量之比。

衍射效率不仅与记录介质有关，还与全息图类型及其条纹对比度有关，后者又与物、参光束比有关。由式（4.2.19）

知：

$$V = \frac{2\sqrt{I_O I_R} |\gamma_{12}(\tau_0)|}{I_O + I_R}$$

故当  $I_O = I_R$  时  $V$  最大， $V_{\max} = |\gamma_{12}(\tau_0)|$ ；若物光与参考光的光程又相等，则  $|\gamma_{12}| = 1$ 。但需考虑散斑噪声和调制噪声的影响。

表示衍射效率的公式分为两类：平面全息和体积全息。

平面全息图的衍射效率：又分振幅型和位相型两种。

## 1) 振幅型全息图的衍射效率

正弦振幅型全息图的透过率可表示成：

$$\tau(x) = \tau_0 + \tau_1 \cos(2\pi f_x x) = \tau_0 + \frac{\tau_1}{2} (e^{i2\pi f_x x} + e^{-i2\pi f_x x})$$

式中  $\tau_0$  是平均透过率； $\tau_1$  是调制幅度。在理想情况下，应有  $\tau_0 = 1/2, \tau_1 = 1/2$

重现时用振幅为A的平面光波照明，则重现的±1级衍射光的振幅为  $A \left( \frac{\tau_1}{2} \right) = \frac{A}{4}$ ，故得最佳衍射效率为

$$\eta = \frac{\left( \frac{A}{4} \right)^2 \Sigma}{A^2 \Sigma} = \frac{1}{16} = 6.25\% \quad (\Sigma \text{ 为全息图的面积})$$

对于非正弦型振幅全息图（设为光栅周期结构），

$$\text{其透射率可表示成: } \tau(x) = \tau_0 + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \tau_m \left[ e^{i2\pi(f_x)_m x} + e^{-i2\pi(f_x)_m x} \right]$$

式 (5.3.7)

在最佳条件下可设为罗奇光栅，

$$\text{其透过率函数为: } \tau(x) = \begin{cases} 1 & 0 < x \leq \frac{d}{2} \\ 0 & -\frac{d}{2} < x \leq 0 \end{cases}$$

式 (5.3.8)

式中d为罗奇光栅周期。上式可展成傅里叶级数：

$$\tau(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ a_m \cos(2\pi m f_0 x) + b_m \sin(2\pi m f_0 x) \right], f_0 = \frac{1}{d}$$

式 (5.3.9)

各傅里叶系数由公式给出：

$$a_0 = 1, \quad a_m = 0, \quad b_m = \frac{1}{m\pi} \left[ 1 - (-1)^m \right]$$

将上式结果代入式 (5.3.9)，最后得：

$$\begin{aligned}\tau(x) &= \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left\{ \sin(2\pi f_0 x) + \frac{1}{3} \sin[2\pi(3f_0 x)] + \frac{1}{5} \sin[2\pi(5f_0 x)] + \dots \right\} \\ &= \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \frac{1}{2i} \left[ \left( e^{i2\pi f_0 x} - e^{-i2\pi f_0 x} \right) + \frac{1}{3} \left( e^{i2\pi(3f_0)x} - e^{-i2\pi(3f_0)x} \right) + \dots \right]\end{aligned}$$

将上式与式 (5.3.7) 对照可知有： $\tau_0 = 1/2, \tau_1 = 2/\pi$

此时±1级衍射光的振幅为： $A \cdot \left( \frac{\tau_1}{2} \right) = \frac{A}{\pi}$

故最佳衍射效率为：

$$\eta = \frac{\left( \frac{A}{\pi} \right)^2 \Sigma}{A^2 \Sigma} = \frac{1}{\pi^2} = 10.13\%$$

故改变透射函数（透射波波型）可适当提高衍射效率。

## 2) 位相型全息图的衍射效率

正弦位相型全息图的透过率可表示成： $\tau(x) = e^{i\phi_1 \cos(2\pi f_x x)}$

其中  $\phi_1$  为调制幅度。由贝塞尔函数恒等式有：

$$e^{ix \cos \varphi} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(x) e^{-in\varphi} \rightarrow \tau(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(x) e^{-i2\pi n f_x x}$$

则第n级的衍射效率为：

$$\eta = \frac{A^2 |J_n(\phi_1)|^2 \Sigma}{A^2 \Sigma} = |J_n(\phi_1)|^2$$

我们感兴趣的是 $\pm 1$ 级衍射。注意到  $\phi_1=1.85$ 时，

$J_1(\phi_1)$  有最大值（见贝塞尔函数曲线）；此时

$$J_1(1.85) = 0.582 \rightarrow \eta = \eta_{\max} = (0.582)^2 = 33.9\%$$

非正弦型位相全息图。在最佳情况下可设其为矩阵波

位相全息图：
$$\phi(x) = \begin{cases} 0 & 0 < x \leq \frac{d}{2} \\ \pi & -\frac{d}{2} < x \leq 0 \end{cases}$$

上式等效于透射率为：
$$\tau(x) = \begin{cases} 1 & 0 < x \leq \frac{d}{2} \\ -1 & -\frac{d}{2} < x \leq 0 \end{cases}$$

的周期性结构的振幅型全息图。



将上式展成傅里叶级数式（5.3.9），容易得：

$$a_0 = 0, a_m = 0, b_m = \frac{2}{m\pi} [1 - (-1)^m]$$

故得：

$$\begin{aligned} \tau(x) &= \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{\sin(2\pi f_0 x)}{1} + \frac{\sin(2\pi(3f_0)x)}{3} + \frac{\sin(2\pi(5f_0)x)}{5} + \dots \right\} \\ &= \frac{2}{i\pi} \left\{ \left( e^{i2\pi f_0 x} - e^{-i2\pi f_0 x} \right) + \frac{1}{3} \left[ e^{i2\pi(3f_0)x} - e^{-i2\pi(3f_0)x} \right] + \dots \right\} \end{aligned}$$

因此， $\pm 1$ 级的最大衍射效率为：

$$\eta = (2/\pi)^2 = 40.4\%$$

表5-3-1 各种全息图衍射效率理论值

全息类型	平面透射型（%）				体积透射型（%）		体积反射型（%）	
调制方式	余弦振幅	矩阵振幅	余弦位相	矩形位相	余弦振幅	余弦位相	余弦振幅	余弦位相
衍射效率	6.3	10.1	33.9	40.4	3.7	100	7.2	100

由此可见，无论是振幅型全息图还是位相型全息图，矩形函数形式的都较正弦型的衍射效率高。

3. 分辨率：是指记录介质所能记录的最高空间频率。记录介质的颗粒越细，则其分辨率越高，衍射效率也越高，噪音越小，但其灵敏度变低。

普通照相底片的分辨率大约为200线/mm，全息底片的分辨率则可达3000–7000线/mm。

记录全息图时对记录介质分辨率的要求与物、参光束间的夹角  $\theta$  有关。可根据光栅方程计算：

$$2d \sin \frac{\theta}{2} = \lambda$$

表5.3.2给出在对称光路下记录透射全息图时，参、物光光束间的最大夹角对记录介质分辨率的要求。

表5.3.2 透射全息图对记录介质分辨率的要求 (a)

参、物光束最大夹角		30°	60°	90°	120°	150°	180°
分辨率 Cy/mm	$\lambda = 632.8$ nm	>818	>1580	>2235	>2740	>3053	>3160
	$\lambda = 514.5$ nm	>1006	>1944	>2749	>3366	>3755	>3887

透射全息图对记录介质分辨率的要求 (b)

参、物光束最大夹角		25°	30°	36°	40°	45°	50°
分辨率 Cy/mm	$\lambda = 457.9$ nm	>945	>1130	>1350	>1494	>1670	>1846
	$\lambda = 441.6$ nm	>980	>1172	>1400	>1550	>1733	>1914

## 4. 特性曲线

人们经常用两条曲线来表示全息底片的特性，一条是 $D \propto \lg E$ 曲线，表示光密度与曝光量对数之间的关系；另一条曲线是 $\tau \propto E$ 曲线。底片的特性曲线要在显影、定影等化学处理后才能最后形成。

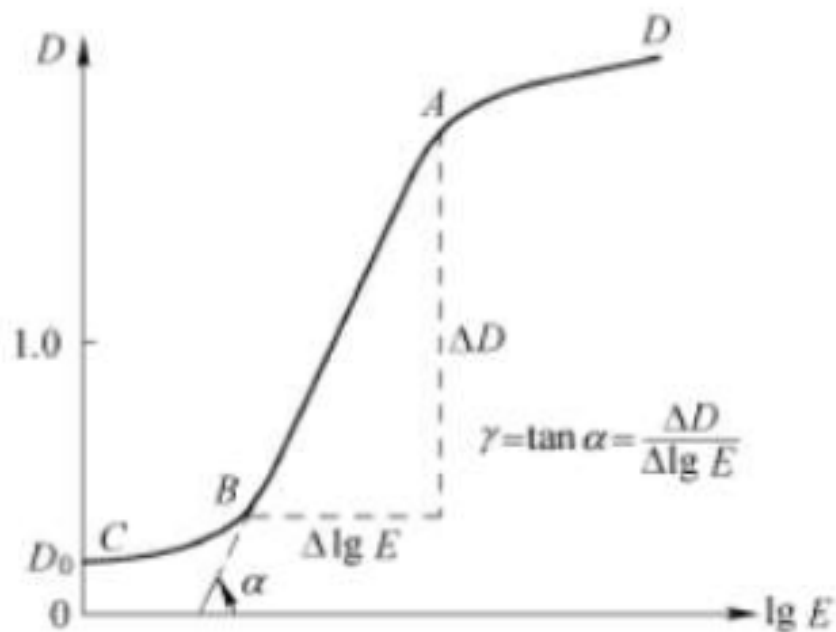


图5.3.4  $D \propto \lg E$ 曲线

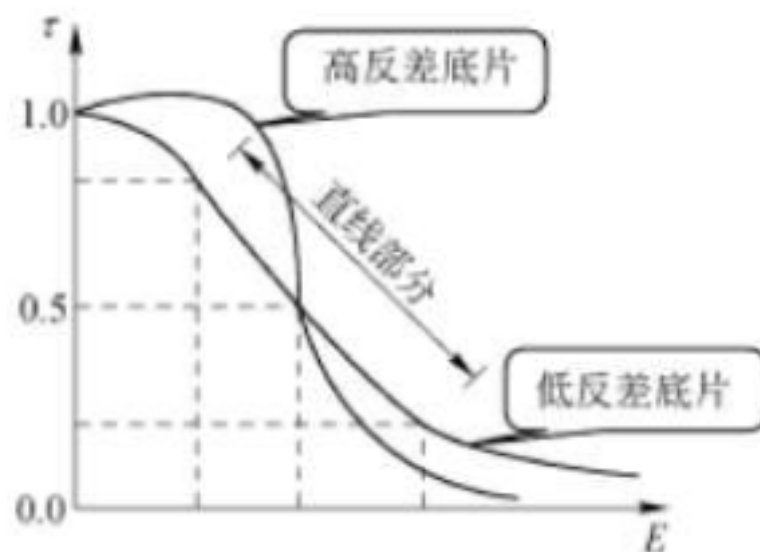


图5.3.5 底片的 $\tau \propto E$ 曲线

## 三、几种常用的全息记录介质

1. 超微粒卤化银乳胶微粒度小到 $0.03\sim 0.08\mu m$ 的卤化银（例如溴化银）混合在明胶中，再加上适量的补加剂（坚膜剂、增感剂和稳定剂），均匀涂布在玻璃片基或醋酸盐胶片上而成。保存期长。

2. 重铬酸盐明胶位相记录介质。是在明胶溶液中加入适量的重铬酸铵溶液而成。具有高衍射效率、高分辨率和低噪声的优点。缺点是怕潮湿，易消像，需要密封。

3. 光致抗蚀剂 记录薄浮雕位相全息图的介质。其分辨率约为1500线/mm，厚度小于 $1.0\mu m$ 。

各种记录介质的灵敏波长见教材P. 161-164.

## 卤化银乳胶介质的处理

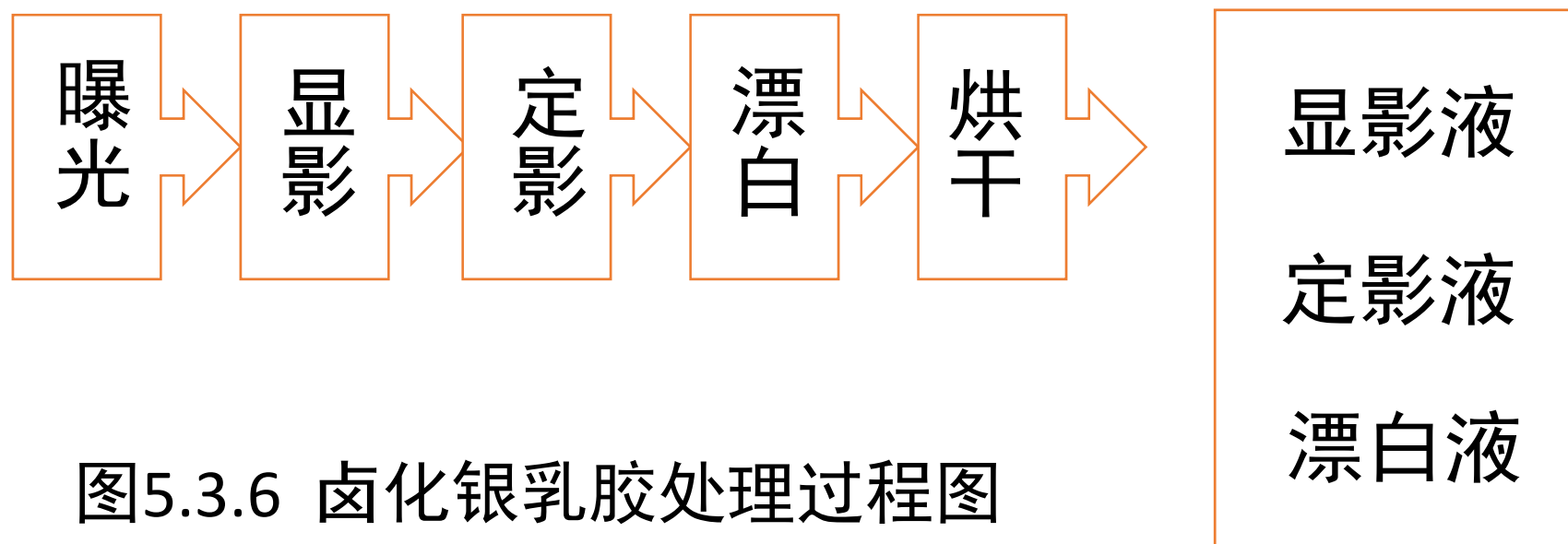


图5.3.6 卤化银乳胶处理过程图

### 卤化银乳胶介质的处理

**曝光**：卤化银晶粒吸收光能量，发生光化学作用而变成银斑，称为显影中心，其集合称为潜像。

**显影**：进行化学处理，显影中心的存在促使卤化银晶粒变成金属银沉积下来。

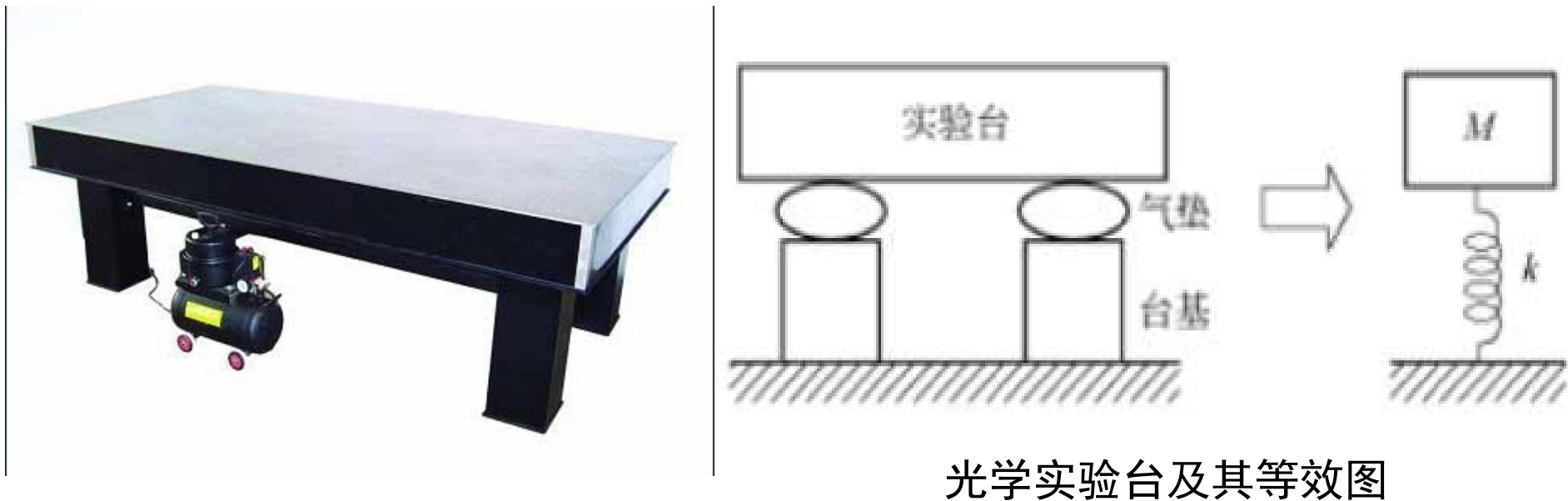
**定影**：进行化学处理，清洗剩余的卤化银晶粒而留下金属银，防止未感光的晶粒再变质成为金属银。

**漂白**：用氧化剂（氧化汞、重铬酸盐、溴化铜等），将金属银还原为透明的银盐，形成位相全息图。



## 四、全息照相所需的设备和元件简介

1. 光学实验台
2. 激光器
3. 曝光定时器或快门
4. 分束器
5. 反射镜
6. 空间滤波器
7. 可变光阑
8. 准直镜
9. 傅里叶变换透镜
10. 照度计
11. 可调衰减器
12. 散射屏
13. 干板架



光学实验台及其等效图

系统固有频率：
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{Mk}}$$

通常希望将实验台的固有振动频率降低到曝光时间的倒数值以下，以使全息记录中不包含上述峰值。

表5. 4. 1 全息照相术常用的激光器

名 称	输出波长 (nm)	输出波长 (nm)	输出方式	激光管长 (m)
$H_e-N_e$ 激光器	632. 8	1 0 ~ 1 0 0	连续	1 . 0 ~ 2 . 0
$H_e-Cd$ 激光器	441. 6, 325. 0	1 0 ~ 1 5 0	连续	1 . 0 ~ 2 . 0
$Ar^+$ 激光器	457. 9, 488. 0, 514. 5	1 ~ 1 0 ( w )	连续	0 . 5 ~ 2 . 0
$Kr^+$ 激光器	476. 2, 568. 1, 647. 1	1 ~ 5 ( w )	连续	0 . 5 ~ 2 . 0
红宝石激光器	694. 3	2 0 0 m J ~ 2 J ( 能 量 )	脉冲	1 . 0 ~ 2 . 0

### 五、全息光路的布置

#### 注意事项：

1. 参、物光光程对记录物中心部位应尽量相等。
2. 参、物光束间夹角应与记录介质分辨率相适应。
3. 参、物光束应与全息台台面平行，高度适中。
4. 采用透镜时，应使其中心位置与光束中心重合。
5. 各元件要用磁性表座紧固于台面。
6. 密切关注激光对人眼的潜在危险！绝对不允许用眼睛正对激光束，还要避免二次光（反射光、折射光和漫反射光）对人眼的伤害。

## 第三讲 傅里叶变换全息图和彩虹全息

## 1、傅里叶变换全息图的记录和重现

**思路：**将物置于透镜的前焦面上，而在透镜的后焦面上就得到物光波的频谱，再引入一参考光与之相干涉，便可以记录下物光波的傅里叶变换全息图。

可以用两种照明方式记录和重现：

**平面波照明和球面波照明**

## 1. 平面波照明记录

物置于透镜的前焦面，在后焦上记录；参考光由位于物平面上的点源  $\delta(y+b)$  产生：

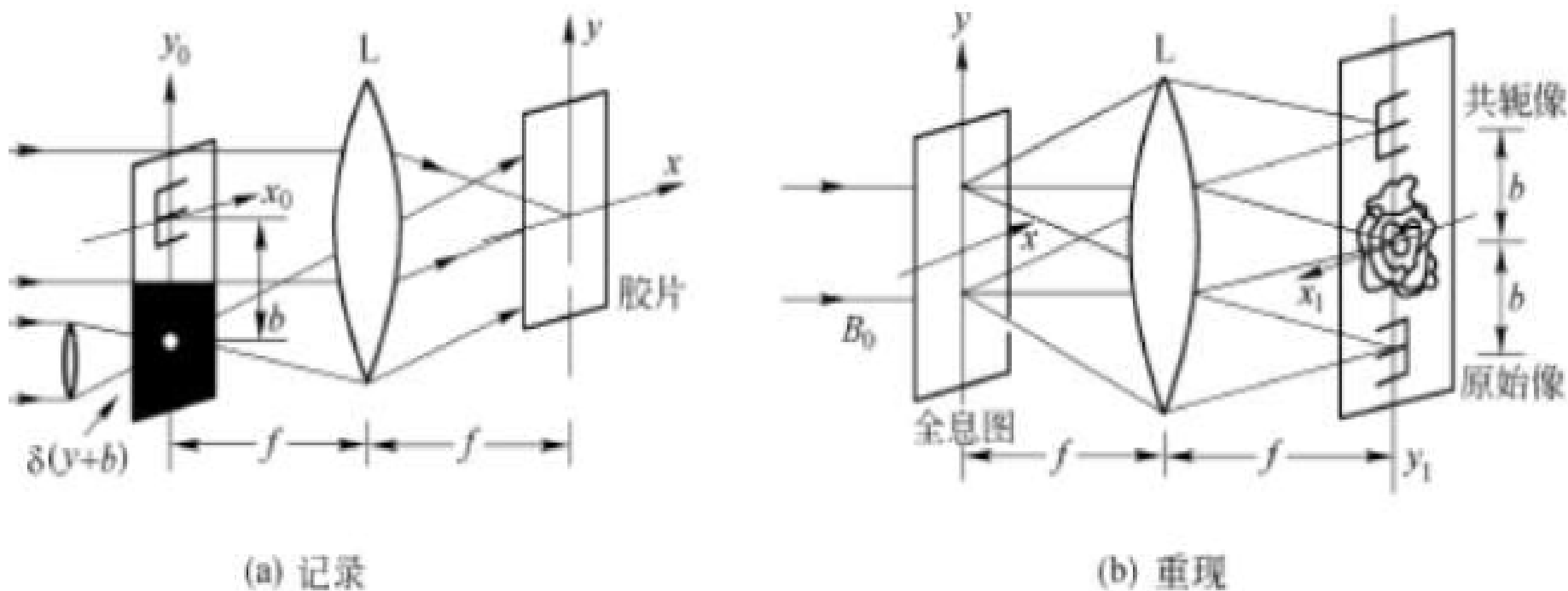


图5.5.1 傅里叶变换全息图的记录和重现  
(平面波照明方式)

$$A(f_x, f_y) = G(f_x, f_y) + A_R e^{i2\pi f_y b}$$

$$I(f_x, f_y) = |G|^2 + A_R^2 + A_R G e^{-i2\pi f_y b} + A_R G^* e^{i2\pi f_y b}$$

在线性记录条件下，全息图的复振幅透过率为：

$$\tau = \tau_0 + \beta \left( |G|^2 + A_R^2 \right) + \beta A_R G e^{-i2\pi f_y b} + \beta A_R G^* e^{i2\pi f_y b}$$

重现时，用平面波  $B_0$  垂直照明，则透射光场为：

$$A'(f_x, f_y) = B_0 \tau_0 + B_0 \beta \left( |G|^2 + A_R^2 \right) + B_0 \beta A_R G e^{-i2\pi f_y b} + B_0 \beta A_R G^* e^{i2\pi f_y b}$$

式中第3项包含物的空间频谱，第4项包含其共轭谱，两者分布在相反的方向各有一个位相倾斜，倾斜角为

$$a = \pm \arcsin(b / f)$$



为了得到物的重现象，必须对其作一次逆变换：

$$\begin{aligned}
 A(f_x, f_y) &= F' \{ A'(f_x, f_y) \} \\
 &= B_0 \tau_0 \delta(x_1, y_1) + B_0 \beta g(x_1, y_1) \otimes g(x_1, y_1) + B_0 \beta A_R^2 \delta(x_1, y_1) \\
 &\quad + B_0 \beta A_\rho g(x_1, y_1) * \delta(x_1, y_1 - b) + B_0 \beta A_\rho g^*(-x_1, -y_1) * g(x_1, y_1 + b) \\
 &= B_0 \tau \delta(x_1, y_1) + B_0 \beta g(x_1, y_1) \otimes g(x_1, y_1) + B_0 \beta A_R^2 \delta(x_1, y_1) \\
 &\quad + B_0 \beta A_\rho g(x_1, y_1 - b) + B_0 \beta A_\rho g^* [(-x_1, -(y_1 + b))]
 \end{aligned}$$

其中第4项是原始像的复振幅，第5项是共轭像的复振幅，两者都是实像。

设物在  $y$  方向宽度为  $W_y$ ，则其自相关宽度为  $2W_y$ ，欲使重现象不受晕轮光的影响，须使  $b \geq \frac{3}{2}W_y$ 。

## 2. 球面波照记录

在点源的共轭像面上记录和重现。

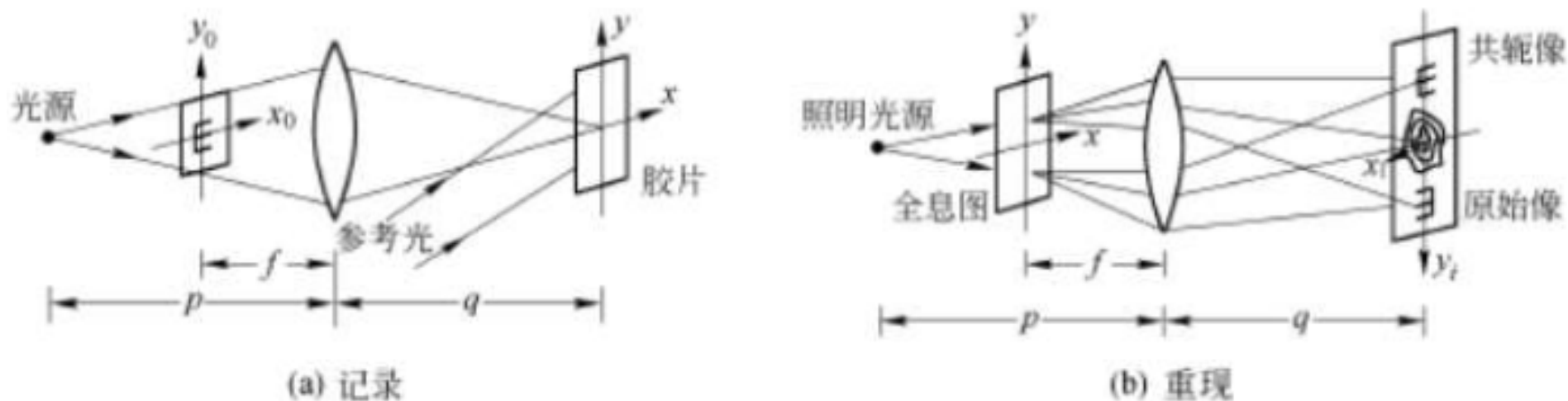


图5.5.2 傅里叶变换全息图的记录和重现

(球面波照方式)

上述两种方式相互独立，也可交叉使用。

由于傅里叶变换全息图记录的是物频谱，而对于大部分低频物来说，其频谱都非常集中，直径仅1mm左右，若用细光束作参考光，则可做全息高密度存储。

## 二. 准傅里叶变换全息图

凡采用带有二次位相因子的傅里叶变换系统记录的全息图，都叫准傅里叶变换全息图。

例如由3.1知：物位于透镜前方 $d$ 处（ $d$ 可以大于或小于 $f$ ）；物紧靠透镜放置；物位于透镜后方 $d$ 处（ $d < f$ ）等等。而物的照明光可平面波，也可以说是球面波。下面以图5.5.3所示光路为例进行讨论。

## 二. 准傅里叶变换全息图

凡采用带有二次位相因子的傅里叶变换系统记录的全息图，都叫准傅里叶变换全息图。例如由3.1知：物位于透镜前方 $d$ 处（ $d$ 可以大于或小于 $f$ ）；物紧靠透镜放置；物位于透镜后方 $d$ 处（ $d < f$ ）等等。而物的照明光可平面波，也可以说是球面波。下面以图5.5.3所示光路为例进行讨论。

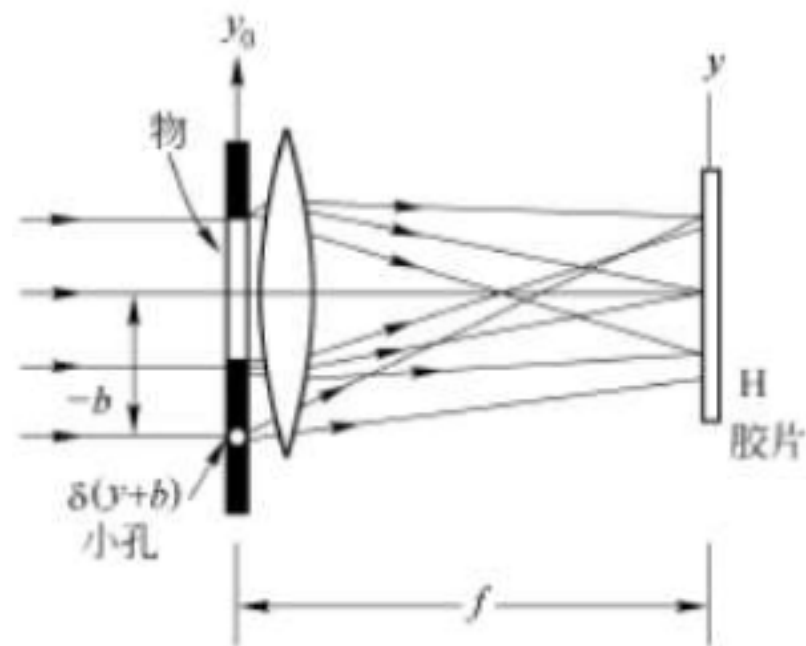


图5.5.3 准傅里叶变换全息图的记录

设物光波为  $g(x_0, y_0)$ ，则在记录面上的物光波分布为

$$G'(x, y) = C' \left[ i \frac{k}{2f} (x^2 + y^2) \right] G(f_x, f_y) \quad (5.5.7)$$

在记录平面上参考光分布为

$$R(x, y) = A_R \exp \left[ i \frac{k}{2f} (x^2 + y^2 + 2by) \right] \quad (5.5.8)$$

物光与参考光在记录平面上相干叠加：

$$A = G'(x, y) + R(x, y) \quad (5.5.9)$$

$$\text{故 } I(x, y) = |G|^2 + A_R^2 + A_R G e^{-i2\pi f_y b} + A_R G^* e^{i2\pi f_y b} \quad (5.5.10)$$

全息图的复振幅透过率

$$\tau = \tau_0 + \beta \left( |G|^2 + A_R^2 \right) + \beta A_R G e^{-i2\pi f_y b} + \beta A_R G^* e^{i2\pi f_y b} \quad (5.5.11)$$

上式与傅里叶变换全息图的复振幅透过率完全相同。这是由于球面参考波的二次位抵消了物函数的位相弯曲所致。因此，尽管到达全息底片平面的光场不是物光场准确的傅里叶变换，但由于参考光波的位相补偿，仍然能得到物体傅里叶变换全息图，故称准傅里叶变换全息图。

准傅里叶变换全息图的重现方式与傅里叶变换全息图的完全相同。

### 三. 无透镜傅里叶变换全息图

**记录：**此时应用菲涅耳衍射与傅里叶变换间的关系。

物体与参考点源位于同一平面内。底片上的物光分布为

$$u_0(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} g(x_0, y_0) e^{i\frac{k}{2z}(x_0^2+y_0^2)} e^{-i2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)} dx_0 dy_0$$

$$= C e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} G(f_x, f_y)$$

式中

$$G(f_x, f_y) = F \left\{ g(x_0, y_0) e^{i\frac{k}{2z}(x_0^2+y_0^2)} \right\}$$

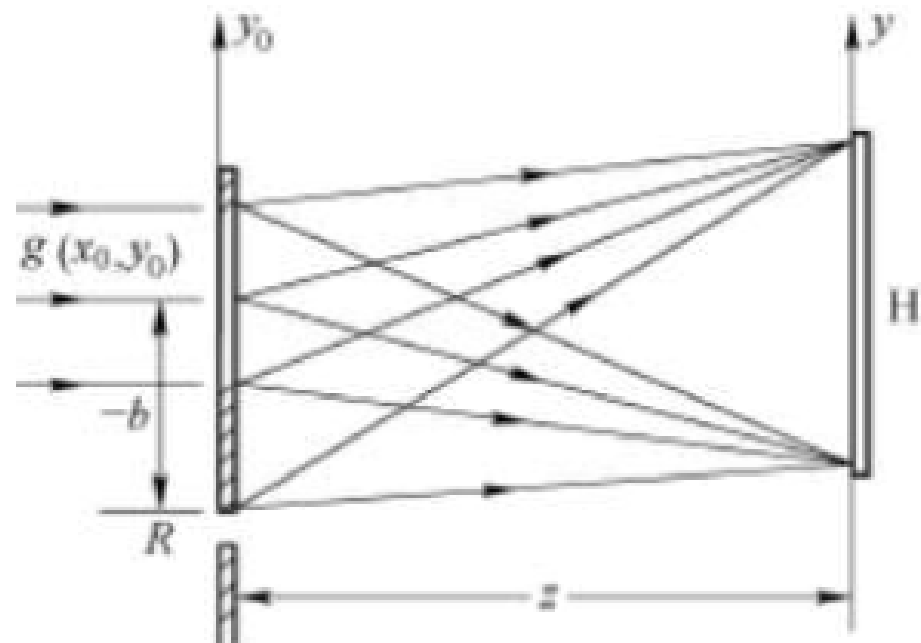


图5. 5. 4 无透镜傅里叶变换全息图记录光路

参考光在全息底片上的光场分布为

$$R(x, y) = A_R \exp\left[i \frac{k}{2z} (x^2 + (y + b)^2)\right]$$

忽略其中的常位相因子，可写成

$$R(x, y) = A_R \exp\left[i \frac{k}{2z} (x^2 + y^2)\right] \exp(i2\pi f_y b)$$

记录平面上的曝光强度为：

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |u_0(x, y) + R(x, y)|^2 \\ &= |u_0|^2 + A_R^2 + CA_R G(f_x, f_y) e^{-i2\pi f_y b} + CA_R G^*(f_x, f_y) e^{-i2\pi f_y b} \end{aligned}$$

物、参光中的二次位相因子已相互抵消。故可省去透镜记录傅里叶变换全息图。



**重现：**即可用发散球面波重现，也可用会聚球面波重现。当用发散球面波 $z_p$  重现时，代表原始像的项为：

$$I_0 = CA_R e^{i \frac{k}{2z_p}(x^2 + y^2)} G(f_x, f_y) e^{-i2\pi f_y b}$$

$$= CA_R \exp\left[i \frac{k}{2z}(x^2 + y^2)\right] G(f_x, f_y) e^{-i2\pi f_y b} \left[ \exp\left[i \frac{k}{2}\left(\frac{1}{z_p} - \frac{1}{z}\right)(x^2 + y^2)\right] \right]$$

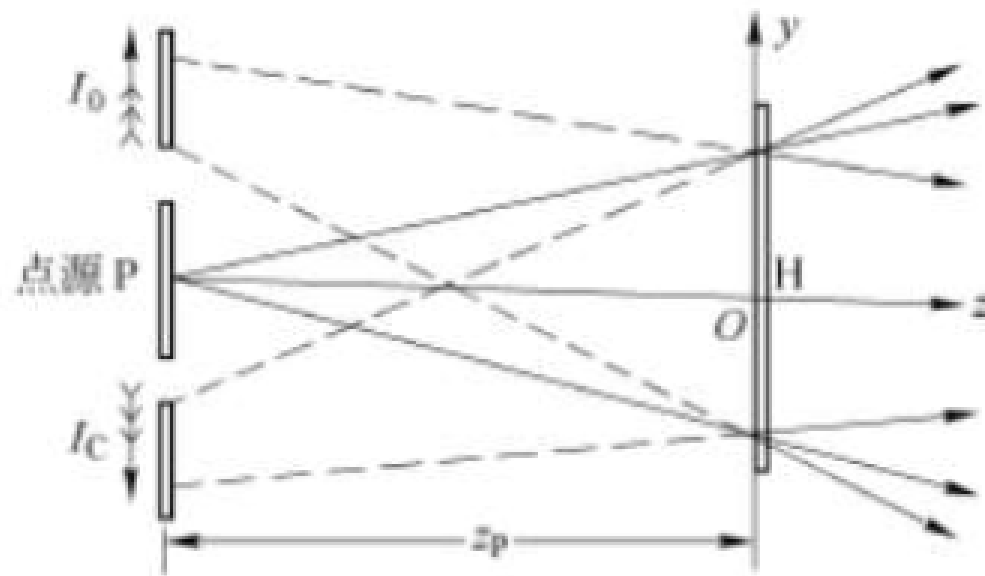


图5.5.5 无透镜傅里叶变换全息图用发散球面波重现

最后一个位相因子的作用相当于透镜，并满足关系式：

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z} - \frac{1}{z_p}$$

其放大率为：  $M = z_p/z$ ，

**讨论：**因 $z$ ， $z_p$ 均为负值，故对重现像大小讨论如下：

- 1) . 当 $z > z_p$ 时， $M > 1$ ， $f < 0$ ，可得到放大的虚像；
- 2) . 当 $z < z_p$ 时， $M < 1$ ， $f > 0$ ，可得到缩小的虚像；
- 3) . 当 $z = z_p$ 时， $M = 1$ ， $f = \infty$ ，在 $(0, b)$ 处得到一个原始像，是正立虚像。

## 四. 像全息图

其记录方式可以用光学系统成像产生的像光波，也可以是把全息重现像作为像光波。

由于像全息图是把成像光束作为物光束记录，相当于“物”与全息干板重合，物距为零，故当用复合光波重现时，重现像的像距也相应为零，各波长的重现像都位于全息图上，将不出现像模糊与色模糊，故像全息图可以用扩展的白光照明重现。

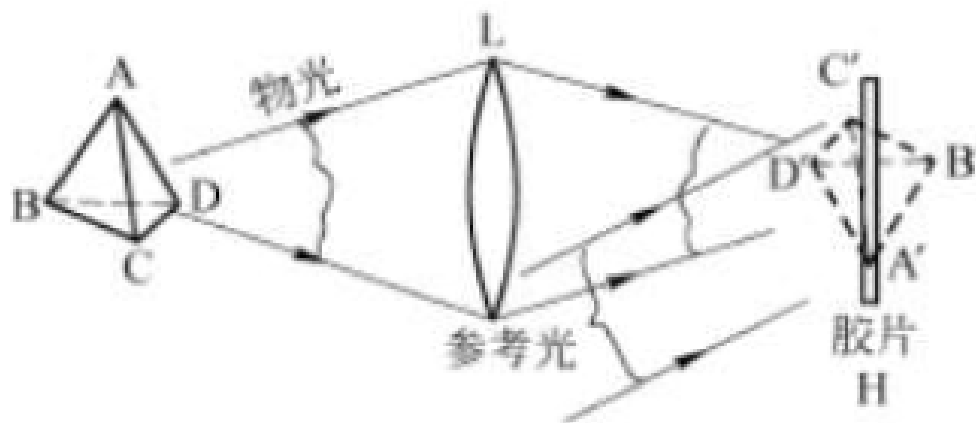


图5.6.1 像全息图的记录方式之一，光学系统成像产生像光波

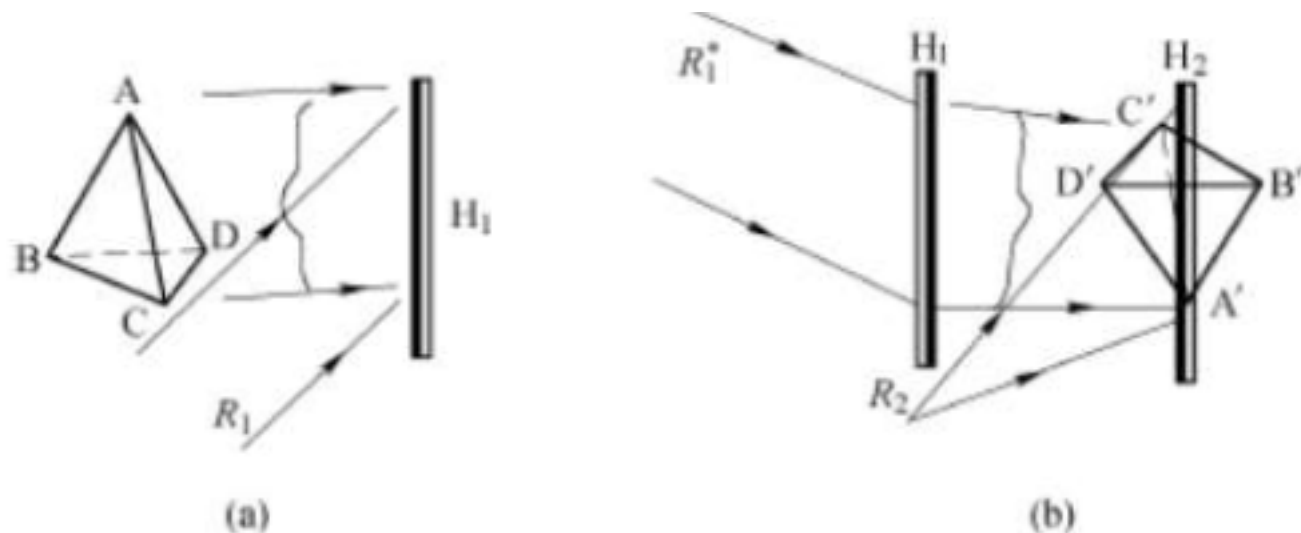


图5.6.2 像全息图记录方式之二，重现实像作为像光波  
(需作两次全息记录)

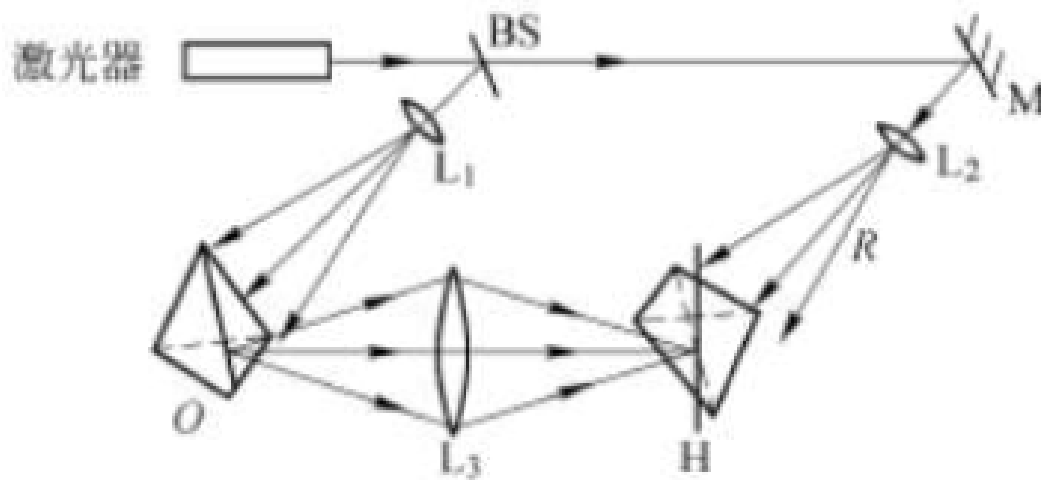


图5.6.3 反射型像面全息图记录光路

## 五. 彩虹全息图

彩虹全息是像全息与狭缝技术相结合的产物。又分为一步彩虹（1978年，陈选和杨正寰）和第二步彩虹（1969年，S. Benton）全息图两种。

### 1. 一步法彩虹全息

记录方法，分为两种记录方式：狭缝置于焦点内或焦点外，重现时眼睛放在狭缝像处观察。制作过程简单，噪声小，缺点是视场受透镜孔径限制大。

## 一步法彩虹全息的记录与重现（狭缝置于焦点外）

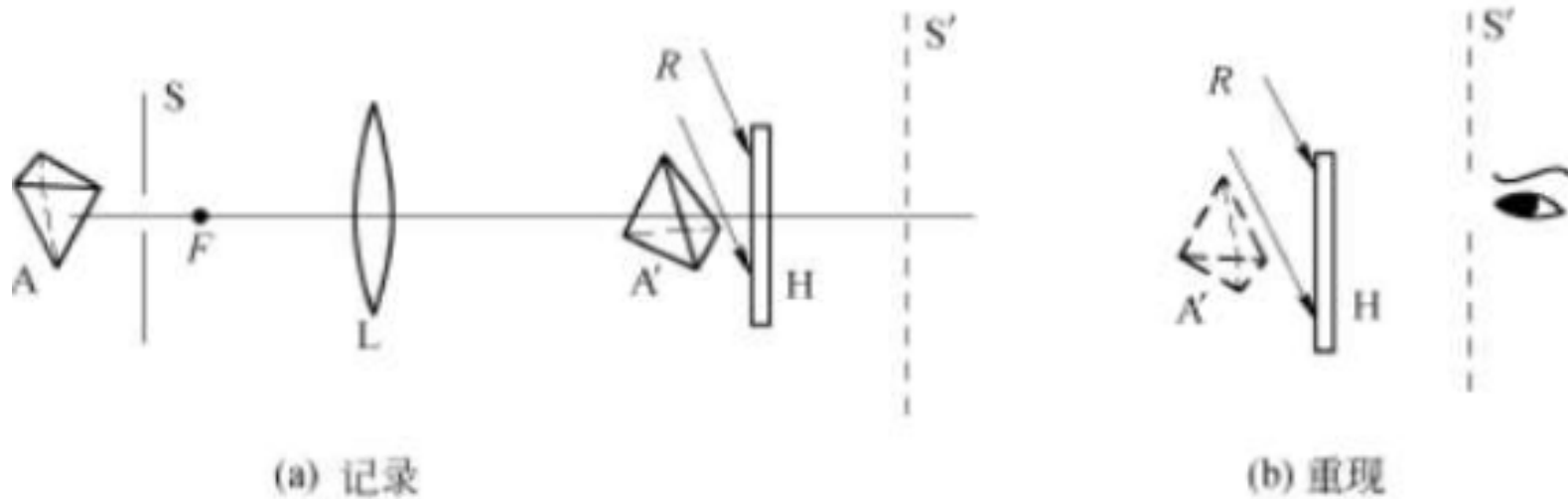


图5.6.4 一步彩虹全息图的一种记录（左）和重现（右）

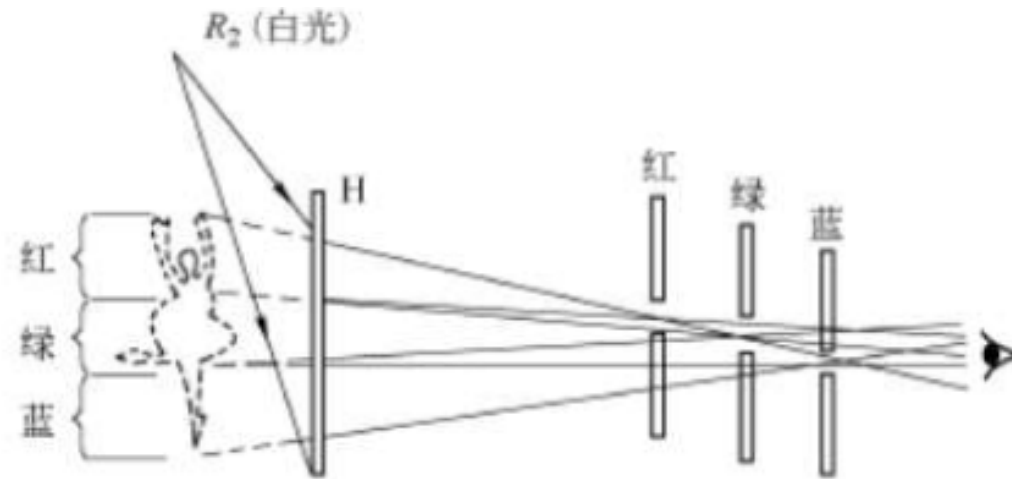


图5.6.5 用白光重现彩虹全息图  
(狭缝像的位置随照明波长变化, 彼此相互错开)

## 一步法彩虹全息的记录与重现（狭缝置于焦点内）

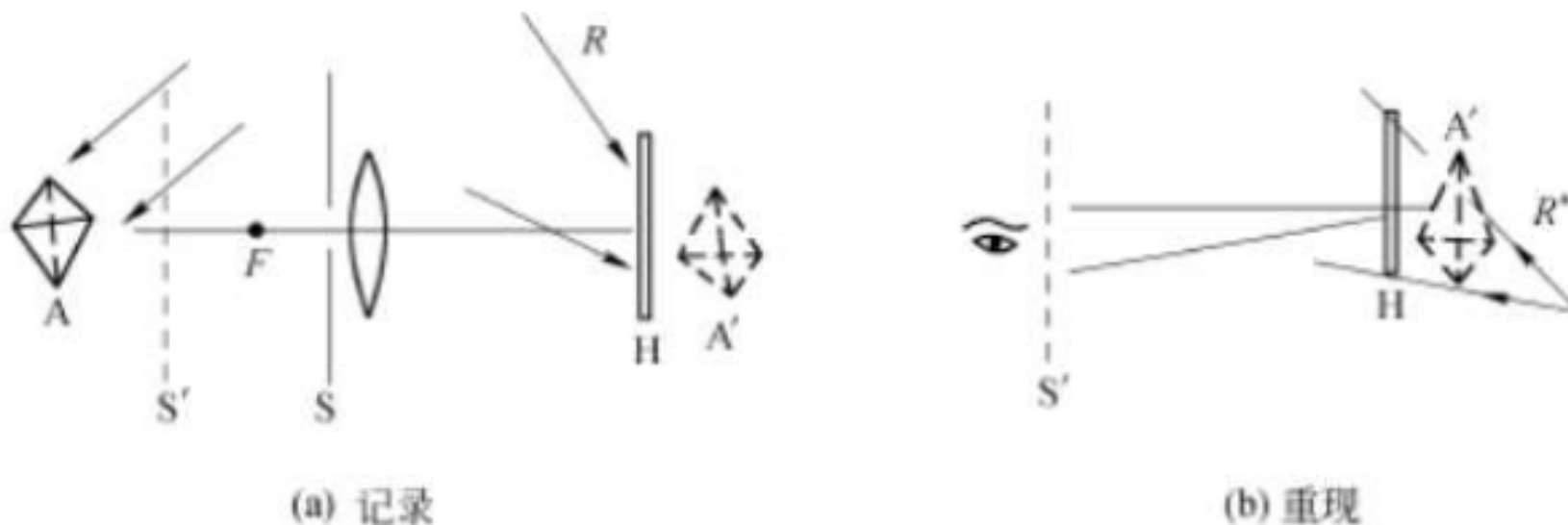


图5. 6. 6 一步彩虹全息图的另一种记录和重现方式

由此看出：狭缝是彩虹全息图的一个关键元件，重现出的狭缝像在观察者的眼前起到了一个单色滤光镜的作用，它使重现像的色彩更加鲜艳。

## 2. 二步法彩虹全息

### ● 二步法彩虹全息的记录与重现

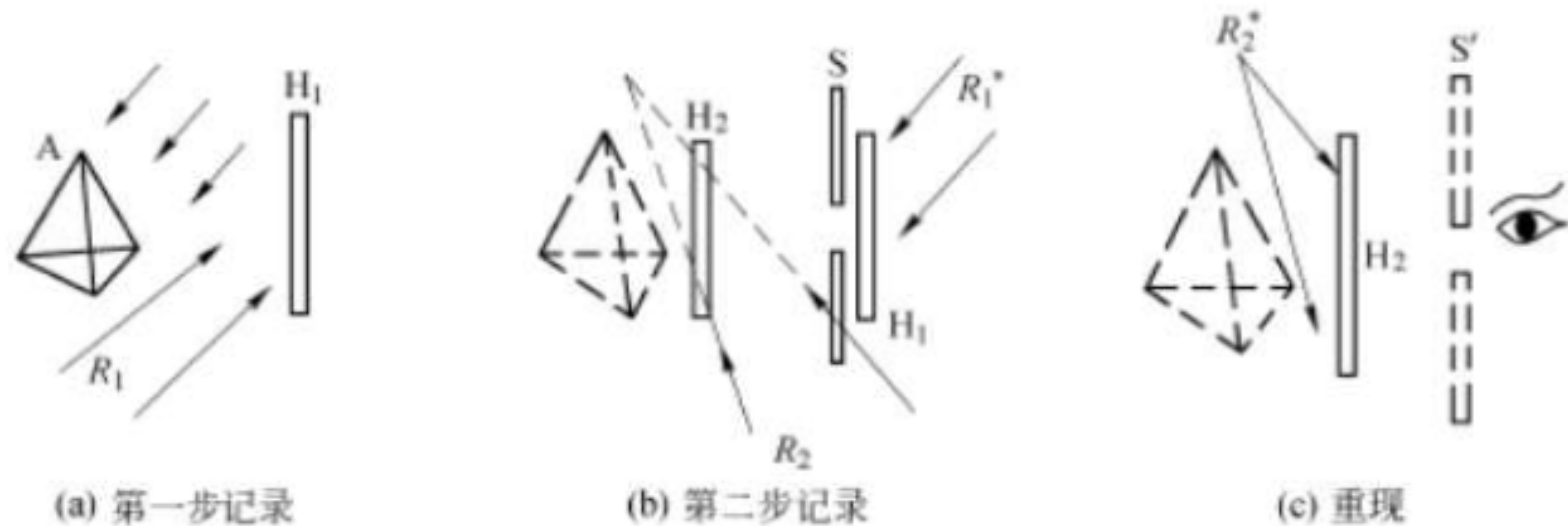


图5. 6. 7 二步彩虹全息图的记录和重现

记录方法：需要首先记录一张主全息图 $H_1$ ，然后用共轭参考光 $R_1^*$ 照明 $H_1$ 产生物体的虚实像，再用会聚的参考光 $R_2$ 记录 $H_2$ 。重现时用 $R_2^*$ 照明 $H_2$ 。



- 二步彩虹全息术的特点：

**优点：**视场大，立体感强。

**缺点：**工艺较复杂，且两次记录过程加重了散斑噪声。

- 实际操作时的注意事项：

(1) 狭缝大小：5-8cm。狭缝的尺寸是关键。缝太窄，光能损失很大，影响衍射效率；缝太宽，重现时会产生“混频”现象，彩色不鲜艳。

(2) 全息图在垂直于狭缝方向已失去了立体感，其碎片已无法重现完整的物体像。

(3) 记录时狭缝须竖放，而物体须横卧；观察时全息图片要在面内旋转 $90^\circ$ 。

- 课后思考：

(1) 为什么像面全息图和彩虹全息图可以用普通扩展光源重现？

(2) 在彩虹全息图的记录光路中，狭缝的作用是什么？其宽度对记录和重现有何影响？

- 下一讲内容：

体积全息图和模压全息图，请注意预览...

## 第四讲 体积全息图和模压全息图

当记录材料的厚度是条纹间距的若干倍时，则在记录材料体积内将记录下干涉条纹的空间三维分布，形成体全息光栅（体积全息图）。

通常把乳胶厚度满足关系式：

$$h \geq 10 \frac{n d^2}{2 \pi \lambda} \quad (5.7.1)$$

的全息图都归为体积全息图。又分为透射型和反射型两。当重现光照射到体积全息图时，干涉曲线簇一方面起衍射作用。同时又起反射面的作用。

## 一. 透射体积全息图

透射全息图是指拍摄时物光与参考光从全息底片的同一侧入射记录的全息图。

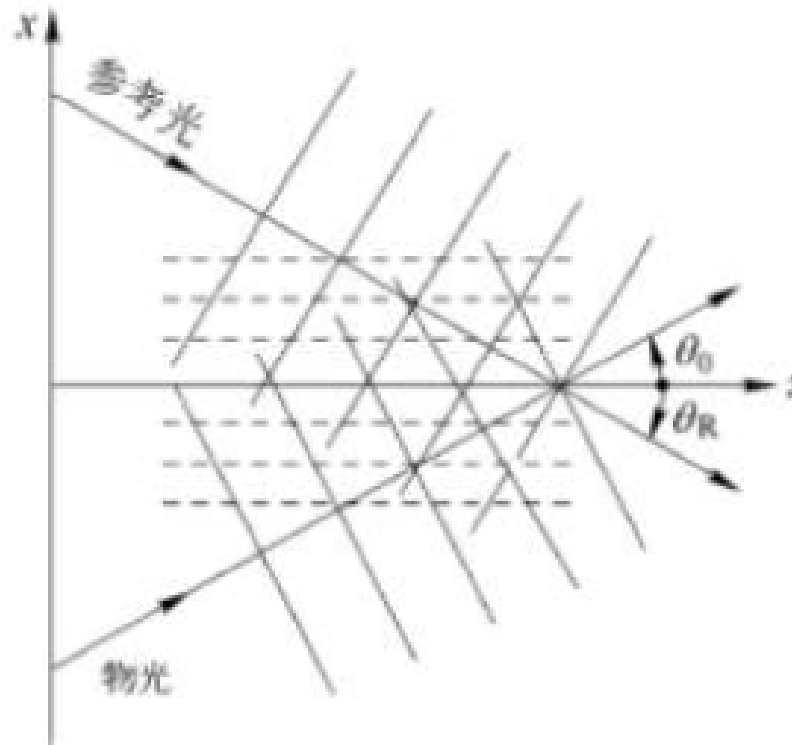


图5. 7. 1 透射体积全息图的记录

设参、物光均为平面波

$$A(x, y) = A_0 e^{i2\pi(x\xi_0 + z\eta_0)} + A_R e^{i2\pi(x\xi_0 + z\eta_0)}$$

其中

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_0 = \frac{\sin \theta_0}{\lambda}, \eta_0 = \frac{\cos \theta_0}{\lambda} \\ \xi_R = \frac{\sin \theta_R}{\lambda}, \eta_R = \frac{\cos \theta_R}{\lambda} \end{array} \right.$$

$$I(x, z) = A_0^2 + A_R^2 + 2A_0A_R \cos \left\{ 2\pi \left[ x(\xi_0 - \xi_R) + z(\eta_0 - \eta_R) \right] \right\}$$

在线性记录条件下：

$$\tau(x, y, z) = \tau_0 + 2\beta A_0A_R \cos \left\{ 2\pi \left[ x(\xi_0 - \xi_R) + z(\eta_0 - \eta_R) \right] \right\}$$
$$(\beta < 0)$$

$\tau$  取极小的条件  $x(\xi_0 - \xi_R) + z(\eta_0 - \eta_R) = m$

$\tau$  取极大的条件  $x(\xi_0 - \xi_R) + z(\eta_0 - \eta_R) = m + \frac{1}{2}$

由此形成与Y轴平行的体光栅，相应形成一系列银层，其与Z轴的倾角

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{dx}{dz} = \frac{\eta_0 - \eta_R}{\xi_0 - \xi_R} = \dots = \operatorname{tg} \left( \frac{\theta_0 + \theta_R}{2} \right)$$

在对称光路布置下，

$$\theta_R = -\theta_0 \rightarrow \xi_R = -\xi_0, \eta_R = \eta_0$$

$$\rightarrow 2\xi_0 x \Big|_{\tau_{\min}} = m \rightarrow d = \frac{1}{2\xi_0} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta_0}$$

体积全息图对光的衍射作用与晶体的布喇格衍射现象类似。

由布喇格条件： $2d \sin \alpha = \pm \lambda$

当 $\alpha = \pm \theta_0$ 或 $\alpha = \pm (\pi - \theta_0)$ 时,得到明亮的重现现象。

透射体积全息图具有对角度敏感的特性。

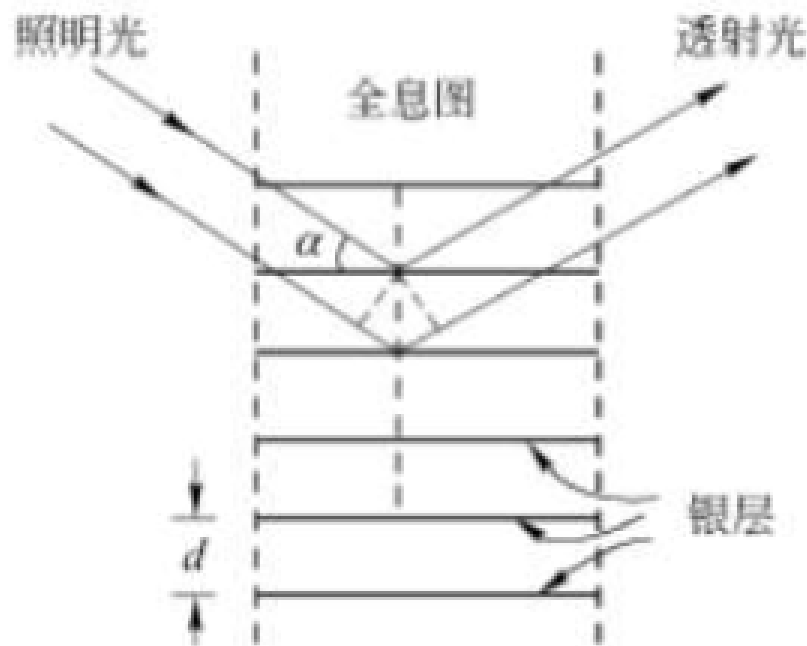


图5.7.2  
透射体积全息图  
的重现

## 二. 反射体积全息图

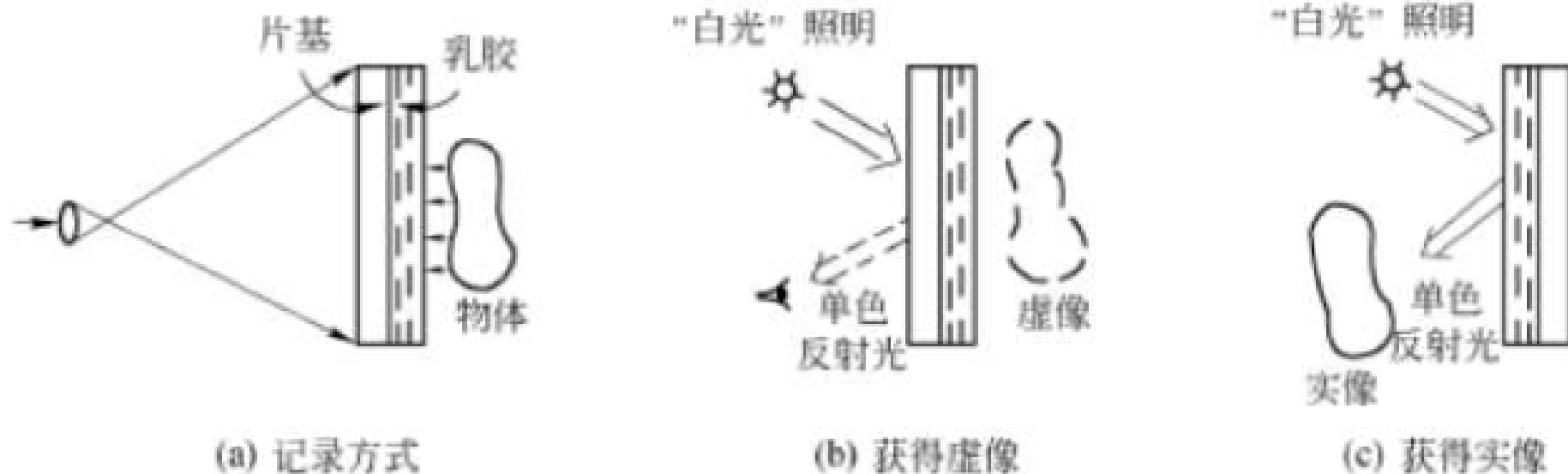


图5.7.3 反射全息图的记录和重现

反射全息图记录时，物光与参考光分别从全息图两侧射来，两者在乳胶层内叠加形成驻波，经显影、定影后形成全息图。



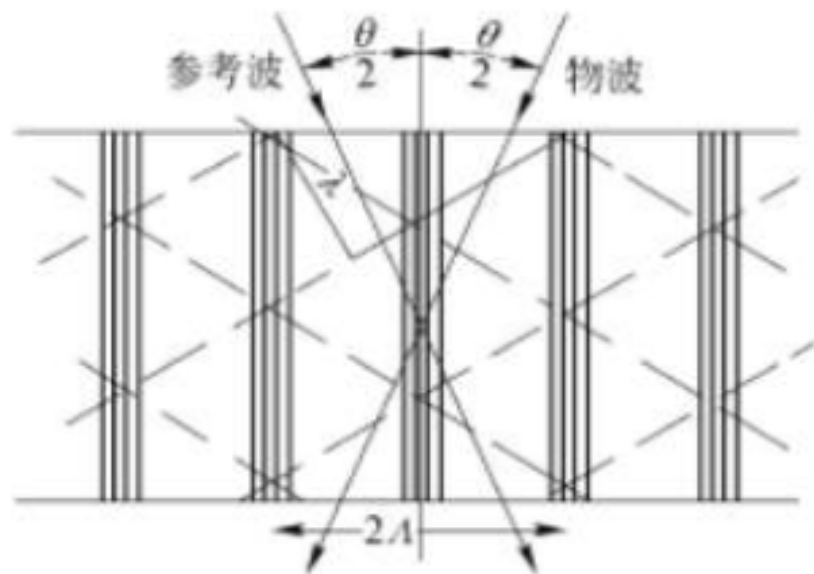


图5.7.4 厚乳胶记录基元全息图

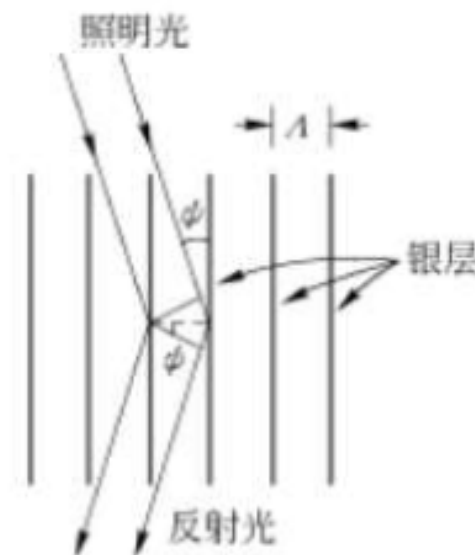


图5.7.5 布喇格条件

重现时用白光照明，沿参考光的反射方向观察。由布喇格条件

$$2A \sin \psi = \pm \lambda$$

式中  $\psi = \frac{\theta}{2}$  得虚像,  $\psi = -(\pi - \frac{\theta}{2})$  得实像。

反射体积全息图的物、参光束之间夹角较大，故对角度的敏感性不如投射型，但对波长的变化敏感。应用后一特性可在光纤通信中制作成布喇格光纤光栅。

## 三. 模压全息图

模压全息图是指记录在浮雕位相介质（如光刻胶）上，经由电铸、热压印等一系列工艺在聚酯膜上，可用白光显示的一种全息图。

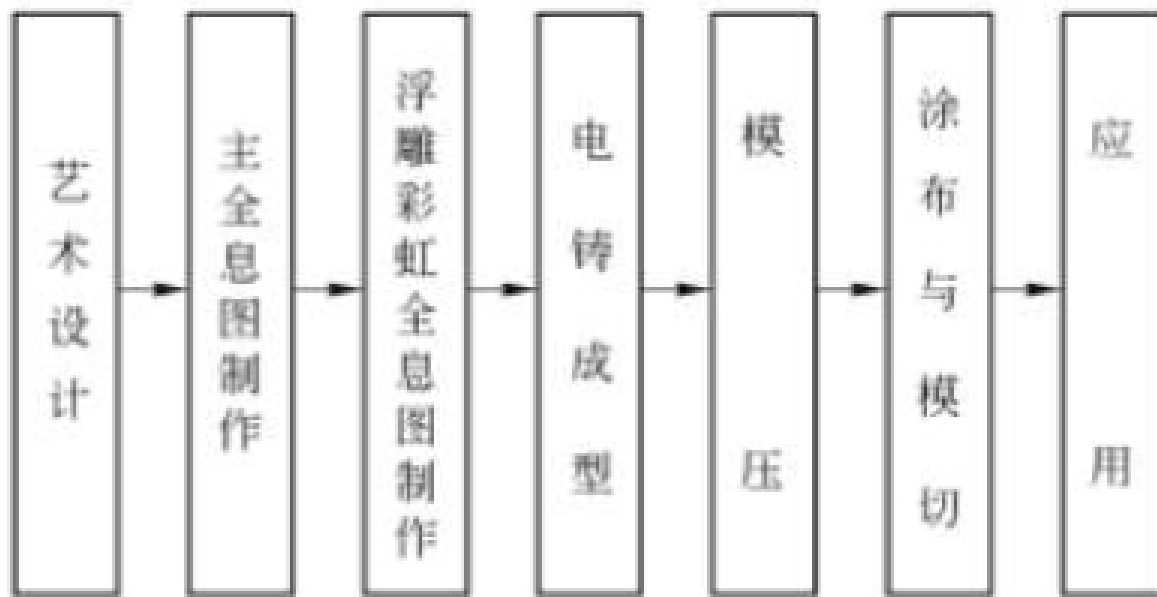


图5.7.7  
模压全息工艺流程

全息图的模压复制技术始于1979年，是由美国无线电公司（RCA）提出，其后有了很大发展。

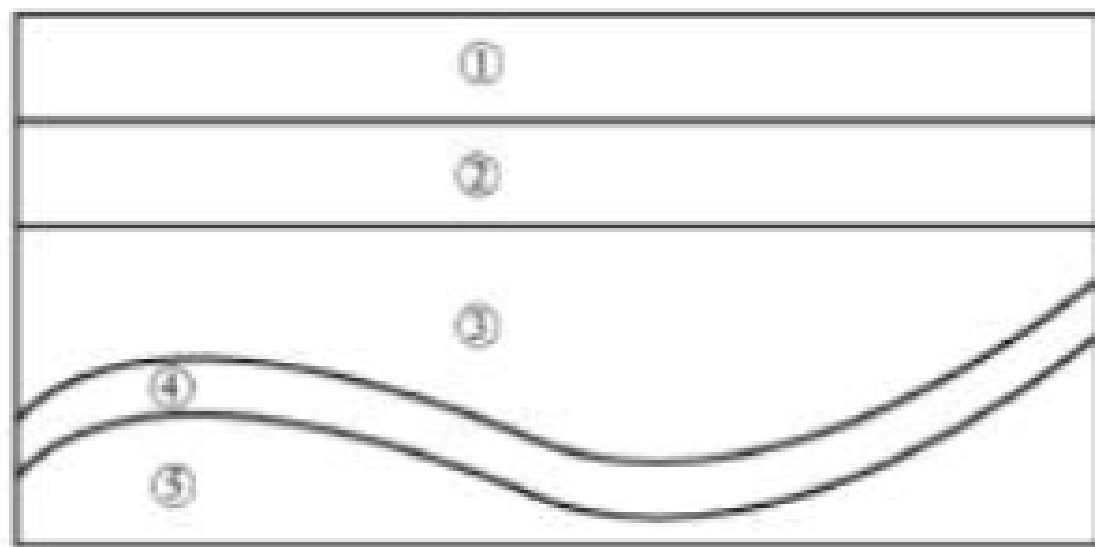


一种模压机照片



## 四. 全息烫印箔

其与模压全息的主要区别是：把信息压入涂覆于聚酯膜载体膜上的特殊树脂层中，并利用叠层结构中的粘合层，通过烫印机直接溶接于各衬底（不需重新粘贴），因而几乎感觉不到实际存在的膜层厚度。



- ① 载体薄膜（聚酯膜）
- ② 剥离层
- ③ 压印层（树脂层）
- ④ 反射层（铝薄层）
- ⑤ 粘合层

图5. 8. 2 全息烫印箔断面结构

## 五. 动态点阵全息图

由大量不同的微小衍射单元即光栅点组成，这些光栅的条纹密度、取向和排列按一定的规律分布，由计算机设计和控制，应用激光进行制作。

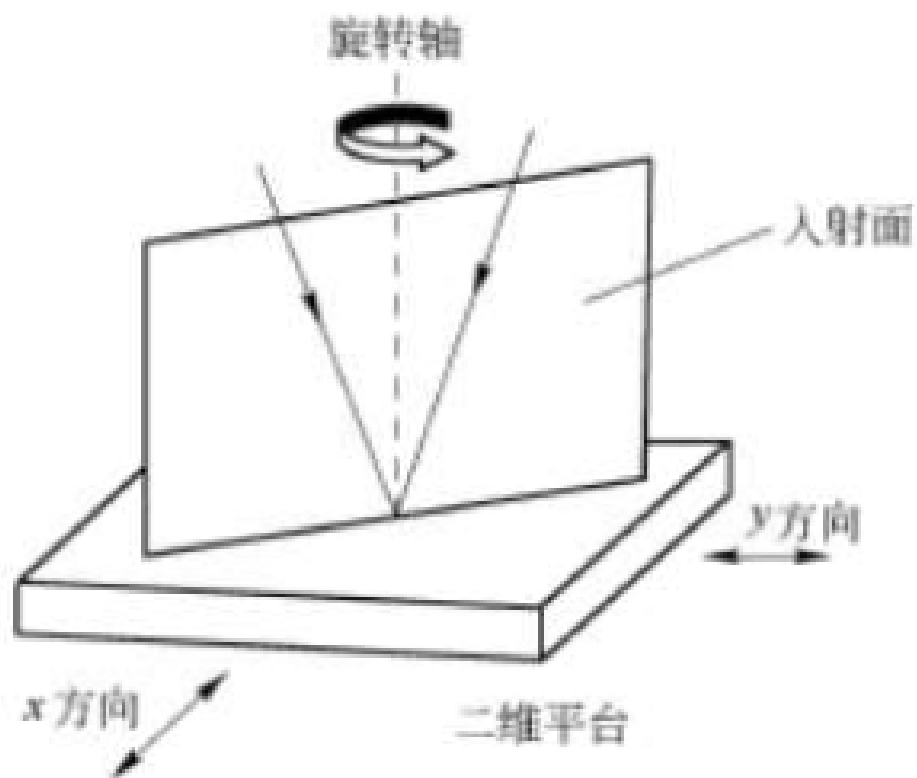


图5.8.3 像素全息图的制作方法

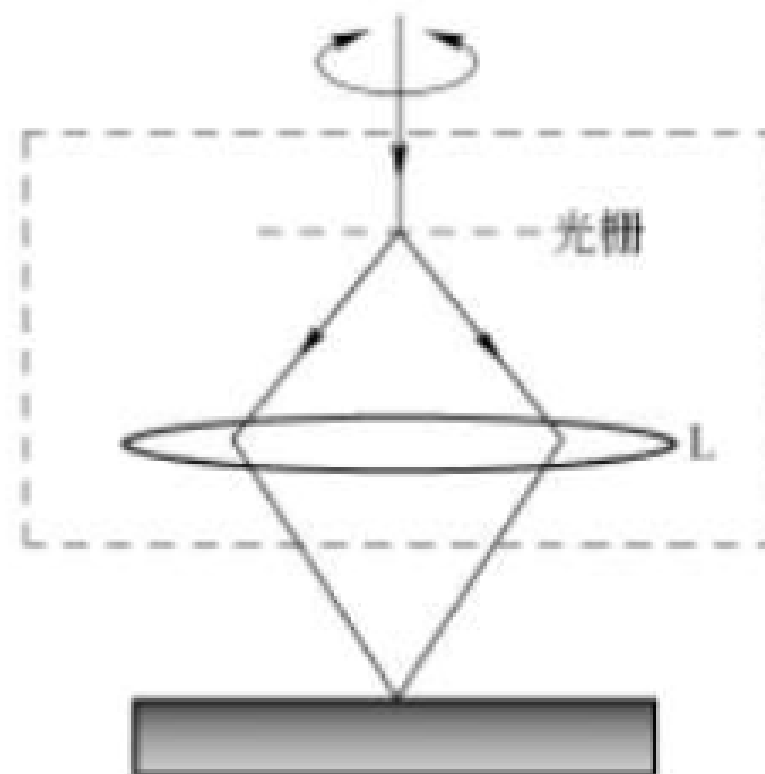


图5.8.4 用光栅作为分束器  
形成条纹

动态衍射图像具有一系列突出**优点**：

- a) 醒目的动感，给使用者以深刻地印象。
- b) 高衍射效率。
- c) 亮度高。
- d) 观察时对照明光的要求较低。在宽光源和弱的散射光下也能看到较为明亮、清晰的图像。
- e) 很难用通常的全息照明方式仿制。

故特别适用于制作防伪标识，是目前模压全息技术发展的主要方向。



## 课后思考：

1. 体积全息图与模压全息图各有何特点？
2. 采用光刻胶干板能否记录反射体积全息图？  
为什么？

## 第五讲 全息照相的应用

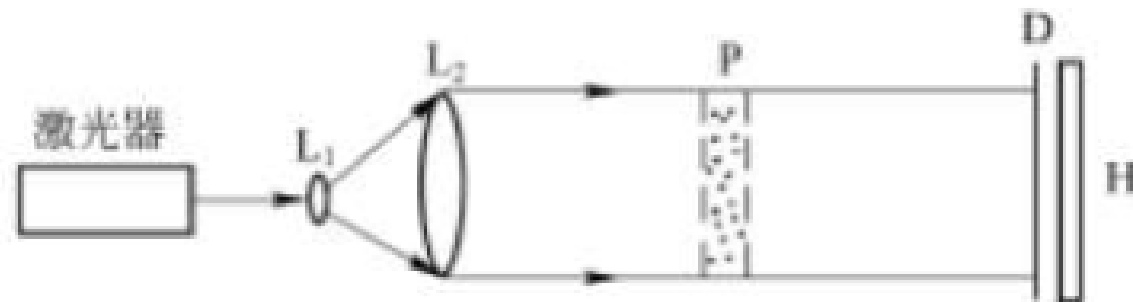
## 全息照相的应用可概括归结为：

1. 全息显示
2. 全息干涉计量
3. 全息光学元件
4. 全息信息存储
5. 全息信息处理
6. 全息显微术

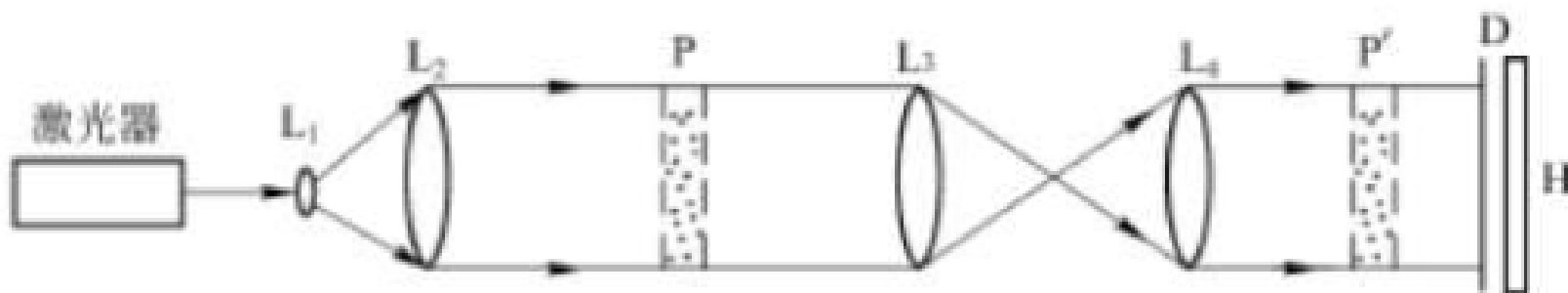
## 一. 全息显示：

1. 新的图片艺术：艺术全息照相，全息肖像，防伪标识，纪念卡，邮折等。
2. 超景深记录（粒子场P）。

图中D为滤光片，用以阻挡激光束以外的杂散光。



(a) 直接记录

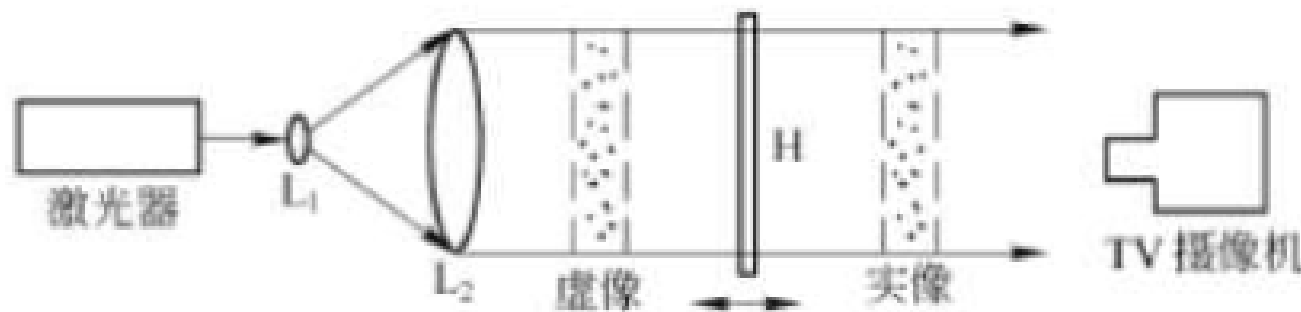


(b) 加转换透镜记录

图5.9.1 粒子场的平行光同轴全息记录方式

粒子场重现光路（图5.9.2）：

仍用平行光照明全息图。其左右两侧各重现出原始物的一个虚像和一个共轭实像。由于粒子尺寸仅在数微粒至数百微米之间，而此“孪生像”彼此分离的距离一般不小于数十厘米，比粒子尺寸大好几个数量级，故当观察重现的虚像时，在观察面上变成一个均匀的背景，和虚像可以分离开来。



（图5.9.2）粒子场重现光路

## 二. 全息光学元件

### 1. 全息光栅

其制作光路如图5. 5. 2。

采用两束平行光记录。

由光栅方程： $2d \sin \frac{\theta}{2} = \lambda$

可通过改变物、参光束间夹角  
控制光栅条纹密度。

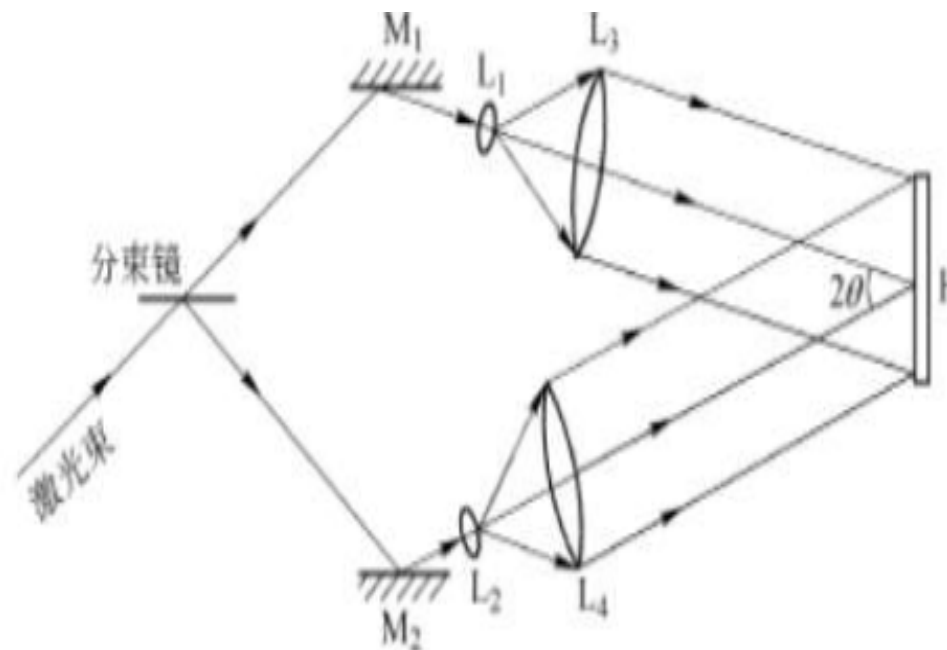


图5. 9. 3 全息光栅记录光路

与刻痕光栅相比，具有**优点**：无鬼线，分辨率高，有效孔径大，生产效率高，价廉。**缺点**是：衍射效率较低。

【例2】用两束夹角各为 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 的相干平面波在记录平面上产生干涉，已知激光波长为 $632.8\text{nm}$ ，求在对称光路情况下（两平面波的入射角相等），该平面上记录的全息光栅的空间频率各为多大？

【解】：由光栅方程  $2d \sin \frac{\theta}{2} = \lambda$

其中  $\theta$  为两束光之间的夹角；算得：

$$f_0 \Big|_{45^\circ} = \frac{1}{d} = 2 \frac{\sin(\theta/2)}{\lambda} = 1209 \text{ 线/mm}$$

$$f_0 \Big|_{60^\circ} = \frac{1}{d} = 2 \frac{\sin(\theta/2)}{\lambda} = 1580 \text{ 线/mm}$$



## 2. 全息透镜

### (1) 点源全息透镜

根据记录介质表面中心的法线与R、O两点源的连线是否重合，可分为**同轴**全息透镜和**离轴**全息透镜；根据R、O两点源各自是否处于全息干板的两侧或同侧，又可分为**反射式**全息透镜与**透射式**全息透镜。

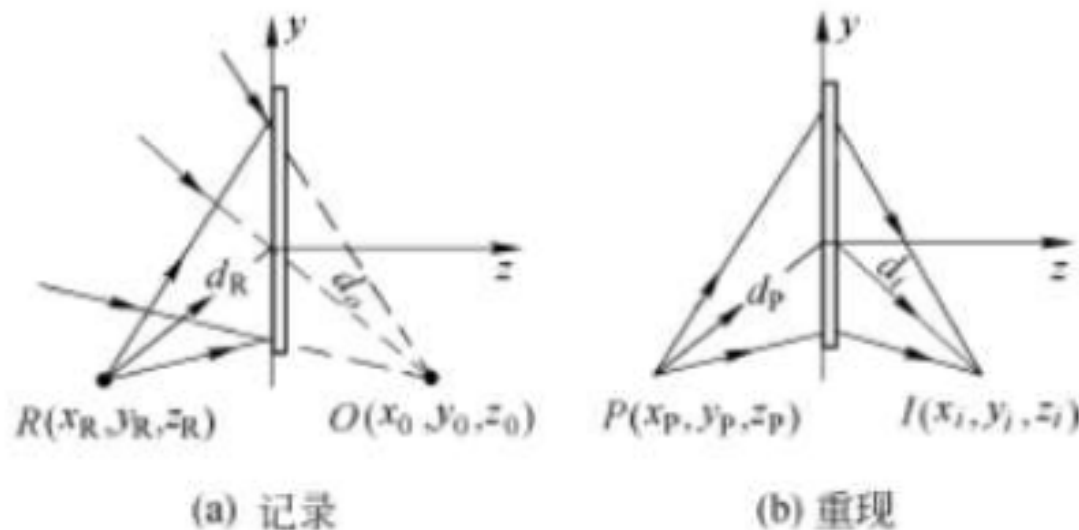


图5.9.4 点源全息透镜原理

## (1) 点源全息透镜（续）

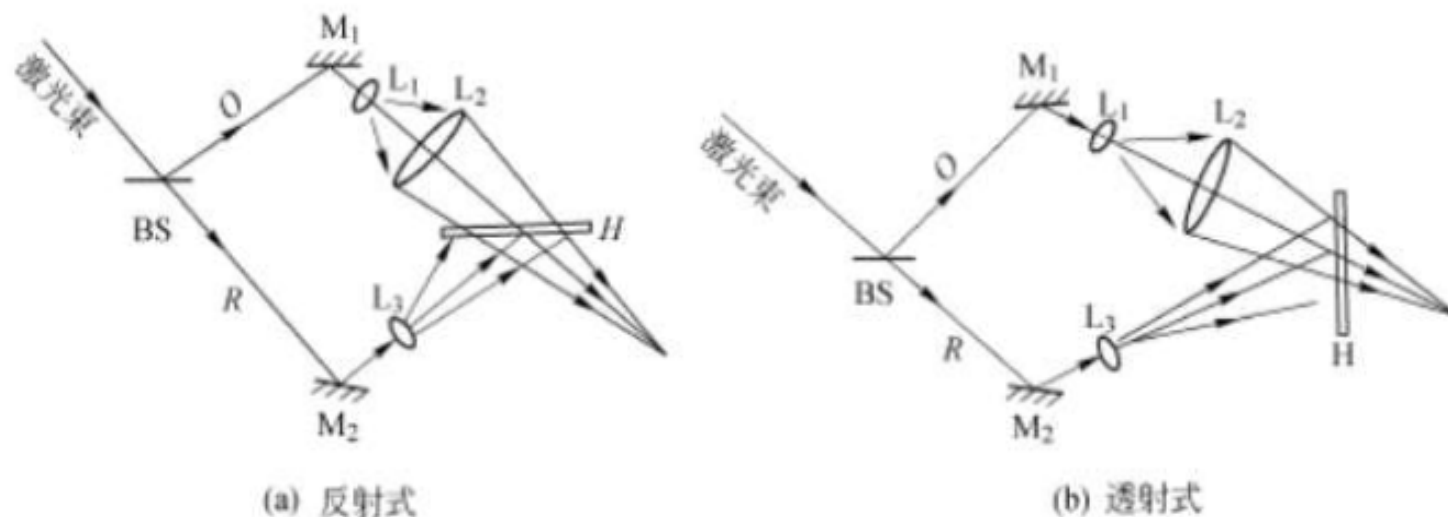


图5.9.5 离轴全息透镜记录光路

理论分析表明：在近轴条件下，全息透镜与普通透镜的几何光学分析具有惊人的一致性，并可按照折射透镜类似的方法进行全息光路设计。

全息透镜的优点：重量轻、造价低、相对孔径大、易于制作和批量复制；缺点是：相差较大。

## (2) 全息透镜阵列

在两个透镜焦点的中间安放全息干板即可记录同轴全息透镜。若干板架可沿x, y方向移动, 则经每次移动、分次曝光, 即可得到全息透镜阵列。

全息透镜的相对孔径可根据图5.9.6的几何结构推得:

$$\frac{D_n}{f_n} = 2 \frac{D}{f}$$

故选择L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>的相对孔径, 即可得到小口径的全息透镜。

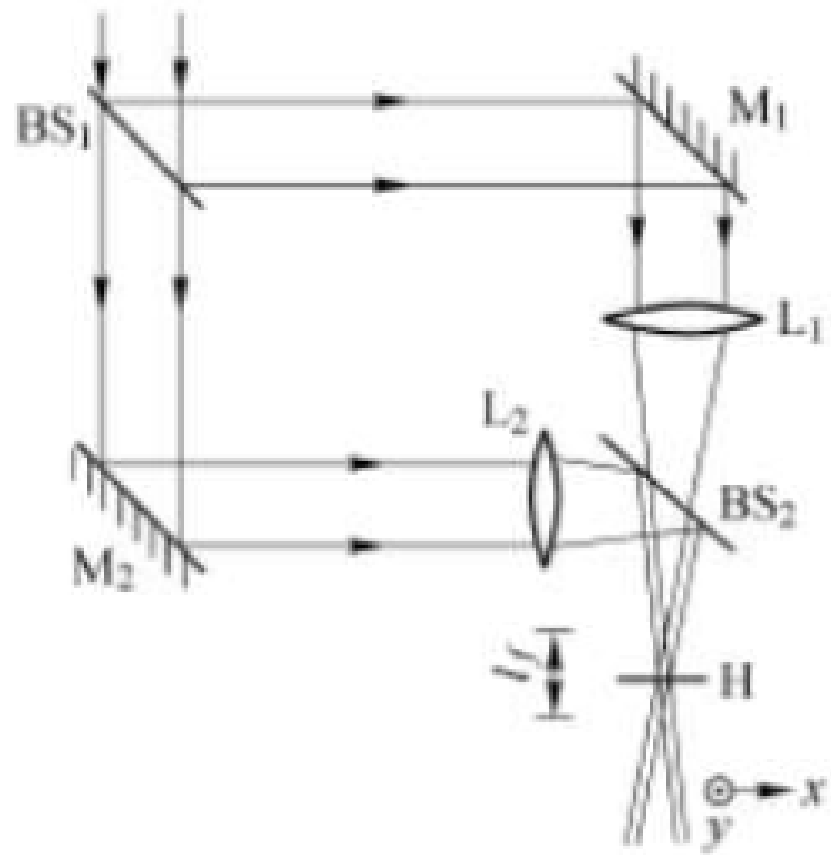


图5.9.7 小口径同轴全息透镜记录光路

## 三. 全息信息存储

### (1) 全息存储器的特点

- 全息图本身具有成像作用，即使不用透镜也能写入和读出信息
- 与按位存储的磁盘及光盘不同，全息图以分布式方式存储信息，冗余度大，信息不易丢失
- 能进行立体存储，还能使很多信息多重叠加，实现大容量高密度存储
- 能与计算机联机实现图文的自动检索，数据读取速率高，并可并行读取
- 还能作联想存储、关联存储等

## (2) 高密度全息存储器

### (应用傅里叶变换全息图)

采用空间叠加多重记录和空间分离多重记录两种记录方式。其存储密度由光学系统最小分辨距离 $\delta_c$ 决定，而后者由系统的截止频率 $\rho_c$ 决定： $\delta_c = \frac{1}{\rho_c} = \frac{2\lambda f}{D}$   
 $\frac{D}{f}$  越大， $\delta_c$  就越小。

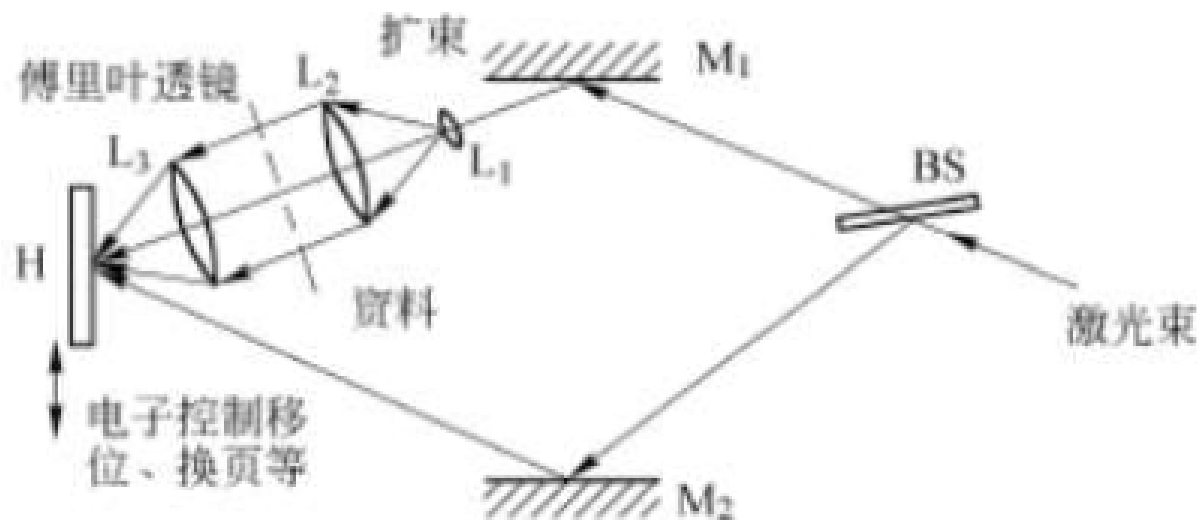


图5.9.8 高密度全息存储光路

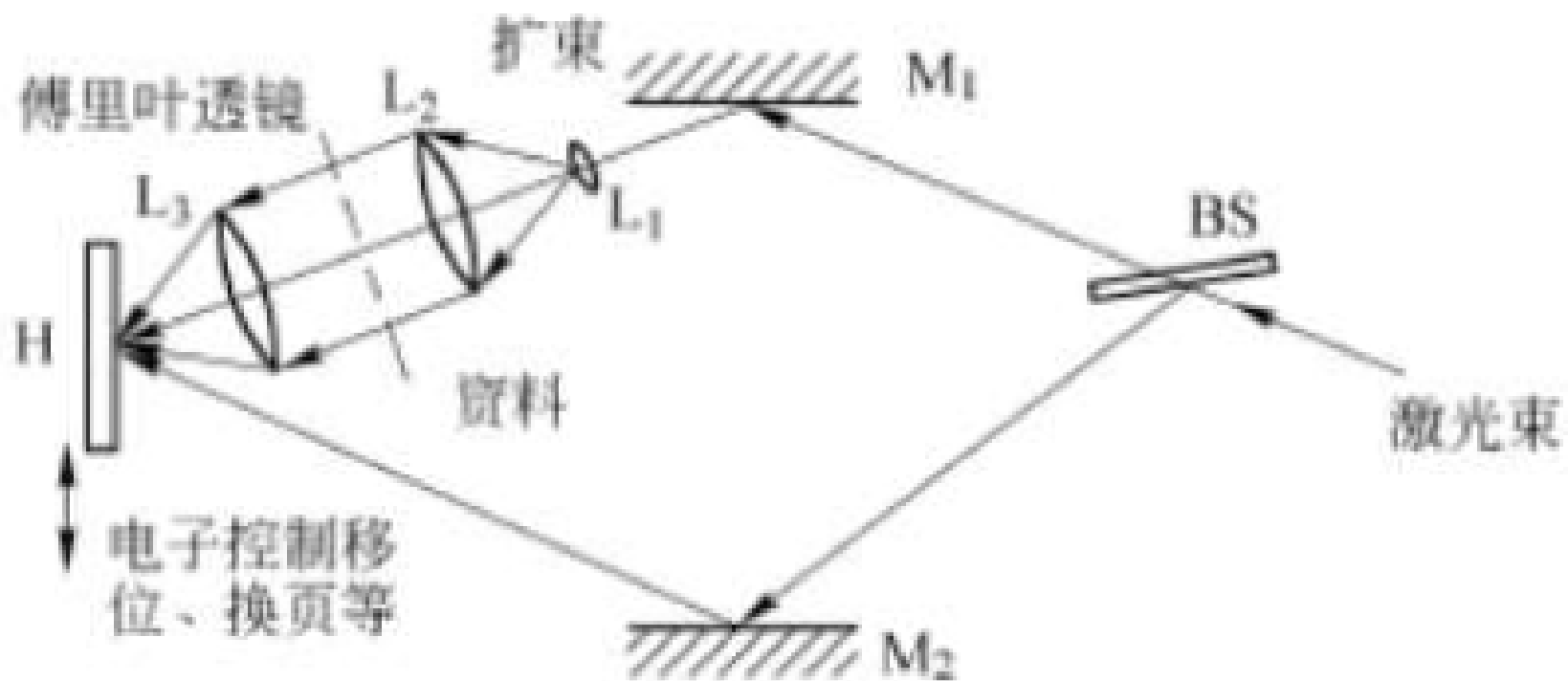


图5.9.8 高密度全息存储光路

## 三. 全息信息存储（续）

### （3）全加密存储

在图文资料后放一个位相编码板D，使物波发生波面变形，则全息图记录了变形后的物光波面。重现时用共轭参考光，仍加入位相板D，即可复原原物实像。

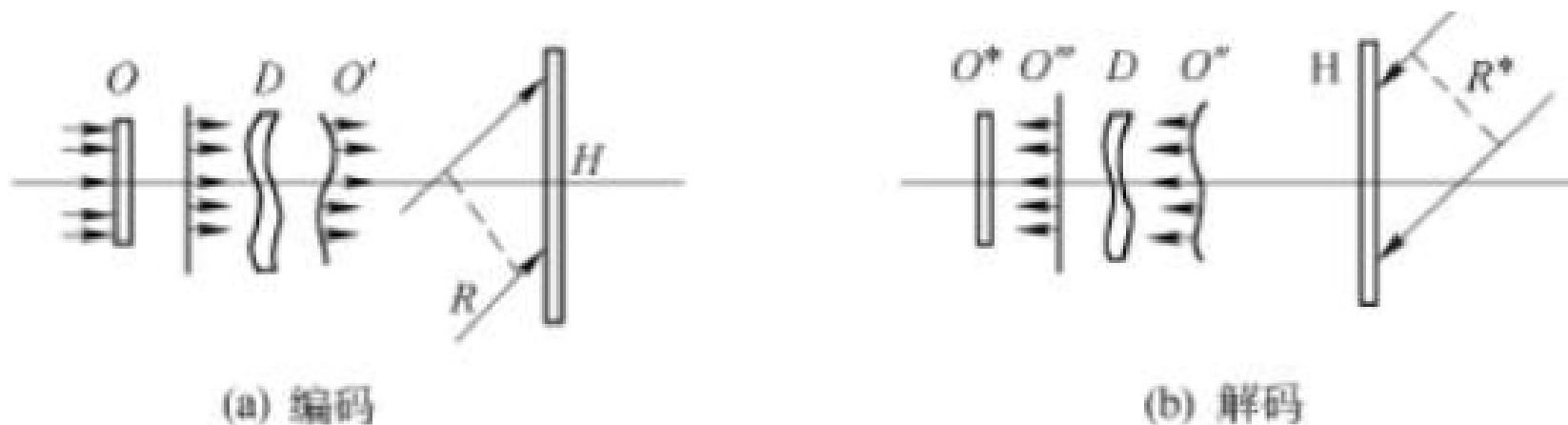


图5.9.9 全息加密存储原理光路

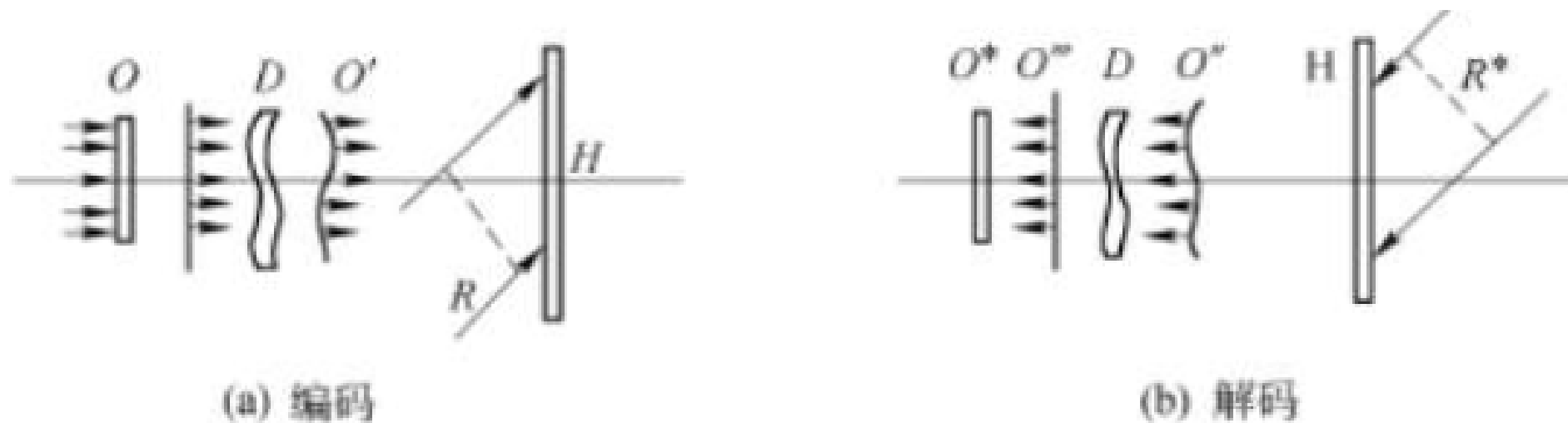


图5.9.9 全息加密存储原理光路



## ● 全息加密存储分析

物光波经过位相编码D后，变为

$$O' = O e^{i\phi_D}$$

当用共轭参考光重现时，产生全息图的第三项：

$$E'_3 = \beta |R|^2 (O')^* = \beta |R|^2 O^* e^{-i\phi_D}$$

位相板D已使原像波前畸变（编码）。当使畸变波  $E'_3$  再次通过位相板时， $E'_3$  将变成  $E''_3$ （编码）；

$$E''_3 = E'_3 e^{i\phi_D} (\beta |R|^2 O^* e^{-i\phi_D}) e^{i\phi_D} = \beta |R|^2 O^*$$

↑  
原始物图像

## 本章重点：

1. 菲涅耳点源全息图原理
2. 全息纪录介质的特性
3. 几类典型的全息图(原理、制作光路)
4. 光栅方程
5. 全息照相的应用