

# 第7章 光全息术

7.1 全息学原理    7.2 各种全息图    7.3 全息应用简介  
习题 4 道

## 7.1 全息术原理

- 概述    •物光波前的全息记录——双光场干涉
- 全息图的衍射场——相因子分析法的运用
- 例题——说明全息再现的放大率    •全息图的观察
- 再现两个虚像或两个实像的可能性    •成像位置和横向放大率

### ● 概述

▲D.Gabor 发明**全息术**于 1948 年，

为了提高电子显微镜的分辨本领；

获 *Nobel* 奖于 1971 年。

*Holograph Holography Holographic Holograms*

全息照相    全息术    全息学    全息图

▲全息照相——无透镜两步成像术

第一步，**干涉术**——物光波前的全息记录

*wavefront holograph,*

第二步，**衍射术**——物光波前的再现

*wavefront reconstruction*

**显示 真三维！**

可见，

**全息术**原理植根于**经典波动光学**，

**全息术**是对经典光学中的干涉术和衍射术的一种

**综合和发展**  $\longrightarrow$

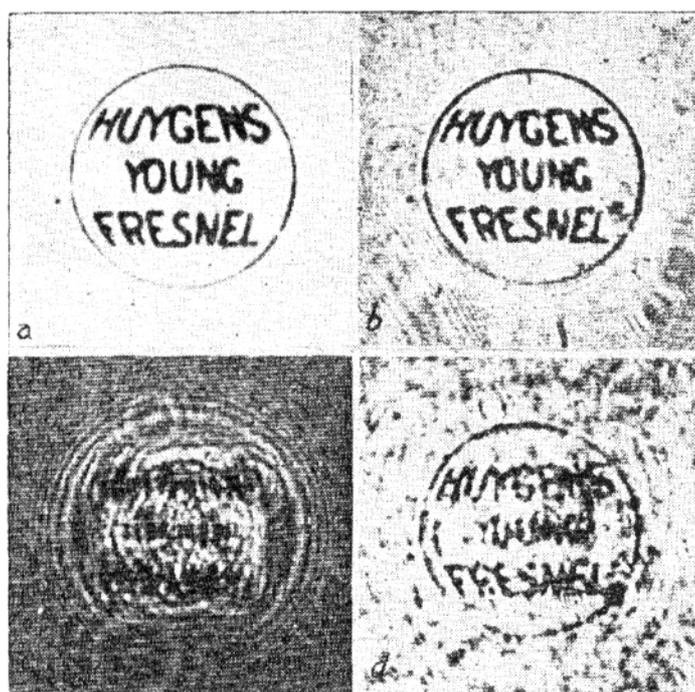
一项重大创新，乃至一场科技革命。

▲原始成果

*A NEW MICROSCOPIC PRINCIPLE*

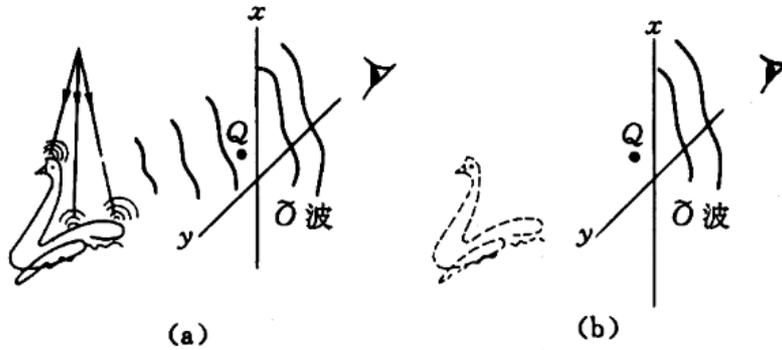
By *Dr. D.GABOR*

*Research Laboratory, British Thomson-Houston Co.Ltd.*

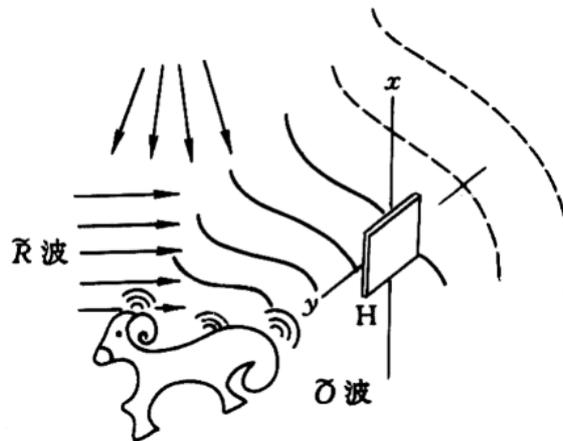


● 物光波前的全息记录——双光场干涉

▲ 再现物光波前的意义



▲ 参考波与物光波的干涉——记录物光波前。



物光波，物光波前  $\tilde{O}(x, y)$ ，

$$\tilde{O}(x, y) = A_0(x, y) \cdot e^{i\varphi_0(x, y)}$$

$$= \sum_n \tilde{u}_n(x, y), \text{ 次波相干叠加——自相干场}$$

参考波  $\tilde{R}$ ，参考光波前  $\tilde{R}(x, y)$ 。

$$\tilde{R}(x, y) = A_R(x, y) \cdot e^{i\varphi_R(x, y)};$$

两者相干叠加于记录介质平面  $H(x, y)$

其干涉场为：

$$\tilde{U}_H(Q) = \tilde{O}(Q) + \tilde{R}(Q),$$

最终记录（感受）的依然是光强分布，

$$\begin{aligned} I_H(Q) &= \tilde{U}_H \tilde{U}_H^* \\ &= (\tilde{O} + \tilde{R})(\tilde{O}^* + \tilde{R}^*) \\ &= |\tilde{O}|^2 + |\tilde{R}|^2 + \tilde{R}^* \tilde{O} + \tilde{R} \tilde{O}^* \\ &= A_0^2(Q) + A_R^2(Q) + A_R(Q) \cdot e^{-i\varphi_R(Q)} \cdot \underline{\tilde{O}} + A_R(Q) e^{i\varphi_R(Q)} \cdot \underline{\tilde{O}^*} \end{aligned}$$

如此表述在形式上，可以理解为：干涉强度分布蕴含了物光波  $\tilde{O}$  与物光共轭波  $\tilde{O}^*$ 。但是，实际上它俩是否能被再现，应取决于“其它因子”的作用。

**这要看第二步**——这张全息图被照明后的光场特性。



布满干涉条纹  
 密密麻麻，  
 弯弯曲曲，

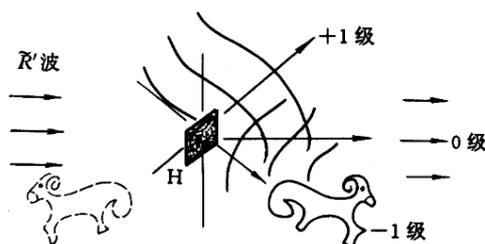
▲线性冲洗后，制成一张 *Hologram*. 这张全息图，就是一张干涉图。

$\tilde{t}_H(Q) \propto \tilde{I}_H(Q)$ ，考虑到“雾底”，应写成

$$\tilde{t}_H(Q) = t_0 + \beta I_H(Q)$$

$$= t_0 + \beta(A_0^2 + A_R^2) + \beta \tilde{R}^* \cdot \tilde{O} + \beta \tilde{R} \cdot \tilde{O}^*$$

● 全息图的衍射场——相因子分析法的运用



▲ 照明光波  $\tilde{R}'$ ，波前函数  $\tilde{R}'(Q) = A'_R(Q) \cdot e^{i\phi'_R(Q)}$

于是，全息图作为一张衍射屏，在  $\tilde{R}'$  波照明下，产生一个复杂的衍射场，其波前函数为透射场或反射场，

$$\begin{aligned} \tilde{U}'_H(Q) &= \tilde{t}_H(Q) \cdot \tilde{R}'(Q) \\ &= \underline{(t_0 + \beta A_R^2 + \beta A_0^2) \tilde{R}'} + \underline{\beta \tilde{R}' \tilde{R}^* \cdot \tilde{O}} + \underline{\beta \tilde{R}' \tilde{R} \cdot \tilde{O}^*} \\ &= \tilde{T}_1 \cdot \tilde{R}' + \tilde{T}_2 \cdot \tilde{O} + \tilde{T}_3 \cdot \tilde{O}^*, \end{aligned}$$

突出三种成分的波， $\tilde{R}'$  波， $\tilde{O}$  波 &  $\tilde{O}^*$  波，将前面的系数统统看为一种变换，一种操作。当然，如果经  $\tilde{T}_i$  操作后，波形态变得面目全非，那上述的分析仅仅具有“形式”，“符号”的意义，无实际光学价值。

▲ 看  $\tilde{T}_i$  的运算操作及其后果

$$\begin{aligned} \tilde{T}_1 &= (t_0 + \beta A_R^2 + \beta A_0^2), \\ \tilde{T}_2 &= \beta \tilde{R}' \tilde{R}^* = \beta A'_R A_R e^{i(\phi'_R - \phi_R)}; \\ \tilde{T}_3 &= \beta \tilde{R}' \tilde{R} = \beta A'_R A_R e^{i(\phi'_R + \phi_R)}. \end{aligned}$$

(1) 先看  $\tilde{\tau}_1$  的作用

一般，参考波是一列平面波或傍轴球面波， $A_R^2 \approx const.$ ，而原物的自相干场  $\tilde{O}(Q) = A_0(Q) \cdot e^{i\varphi_0(Q)}$  中的振幅分布，严格上说是复杂的，不是均匀的，但是其主要成分是“低频”（慢变），且“很弱”，可以作为一种光“噪声”看待。总之，

$\tilde{\tau}_1 \cdot \tilde{R}'$  项表示了**照明光波的直接透射波**，比例系数的改变并未改变其波前的主要特征。

(2) 再看  $\tilde{\tau}_2$  &  $\tilde{\tau}_3$  的作用

领先提要  $\tilde{R}' = \tilde{R}$ ，  $\tilde{R}' = \tilde{R}^*$ ，  $\tilde{R}' \neq \tilde{R}$

▲典型情况之一，

$\tilde{R}'$  与  $\tilde{R}$  是全同的平面波，

**正入射情形**，

$$\tilde{R}' = A'_R, (\varphi'_R = 0); \quad \tilde{R} = A_R, (\varphi_R = 0);$$

于是  $\tilde{\tau}_2 = \beta A'_R \cdot A_R$ ，  $\tilde{\tau}_3 = \beta A'_R A_R$ 。

有  $\tilde{\tau}_2 \tilde{O} = \beta A'_R A_R \tilde{O}$ ，物光波的真实再现，

$\tilde{\tau}_3 \tilde{O}^* = \beta A'_R A_R \tilde{O}^*$ ，物光共轭波的伴生。

两者 尺寸 1:1，原物大小 } 原生像  
且 在 镜像对称位置 }

### 斜入射情形

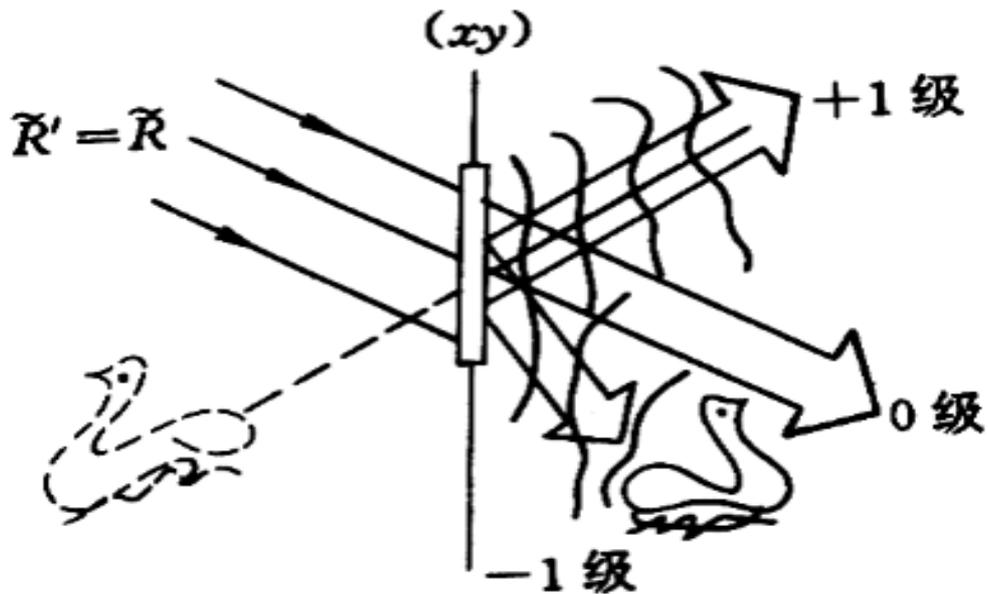
$$\tilde{T}_2 = \beta \tilde{R}' \tilde{R}^* = \beta A'_R A_R e^{i(\varphi'_R - \varphi_R)} = \beta A'_R A_R.$$

$\tilde{T}_2 \tilde{O}$  项表明了原物光波的真实再现；

$$\tilde{T}_3 = \beta \tilde{R}' \tilde{R} = \beta A'_R A_R e^{i(\varphi'_R + \varphi_R)} = \beta A'_R A_R e^{i2\varphi_R}$$

$= \beta A'_R A_R \times (\text{线性相因子}) \rightarrow \text{等效薄透镜的作用,}$

于是  $\tilde{T}_3 \tilde{O}^*$  表明孪生的共轭波有了偏移，重现的物光波与孪生波不再有镜像对称关系。



▲典型情况之二， $\tilde{R}'$  与  $\tilde{R}$  是全同的球面波，

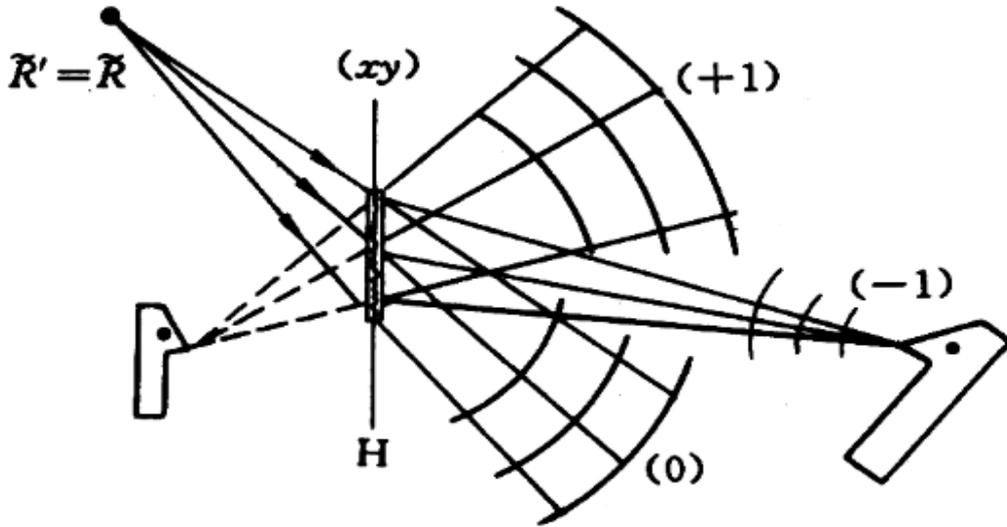
于是  $\varphi'_R(Q) - \varphi_R(Q) = 0$ ， $\varphi'_R + \varphi_R = 2\varphi_R$  是二次相因子，

故  $\tilde{T}_2 \tilde{O} = \beta A'_R A_R \tilde{O}$ ，是物光波的真实再现；

$$\tilde{T}_3 \tilde{O}^* = \beta A'_R A_R \times (\text{二次相因子}) \cdot \tilde{O}^*$$

= (等效透镜)  $\cdot \tilde{O}^*$ ，表明了孪生波有了缩放，

移位和偏移。



▲典型情况之三， $\tilde{R}' = \tilde{R}^*$ ，互为共轭波。

即  $\varphi'_R(Q) = -\varphi_R(Q)$ ，于是

$$\tilde{T}_2 \tilde{O} = \beta A'_R A_R e^{-i2\varphi_R(Q)} \tilde{O},$$

其中， $2\varphi_R(Q)$ ，或者是“二次相因子”，或者是

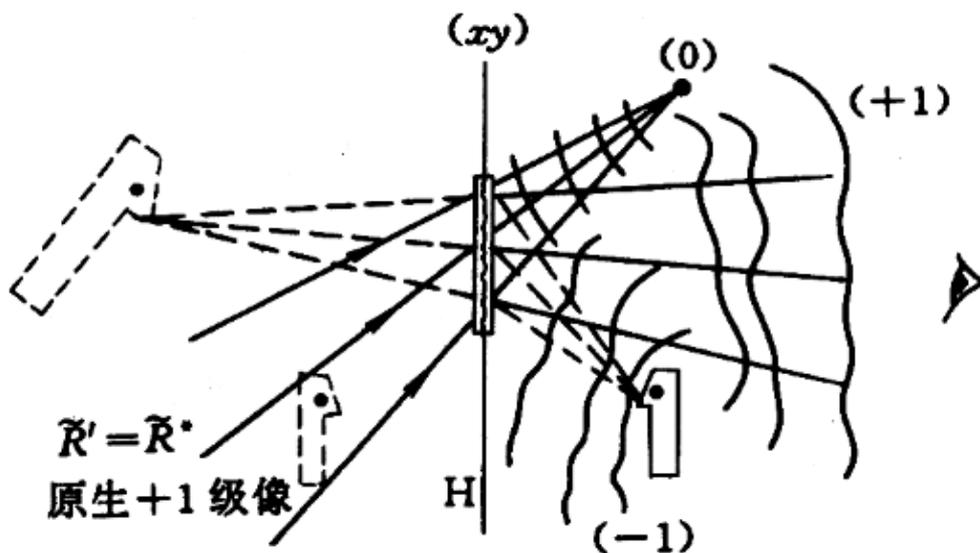
“线性相因子”，或者“既有二次又有线性”，

作用于 $\tilde{O}$ 波，使其聚散、偏转、位移和缩放；

而此时

$$\tilde{T}_3 \tilde{O}^* = \beta A'_R A_R e^{i(\varphi'_R + \varphi_R)} \tilde{O}^* = \beta A'_R A_R \tilde{O}^*,$$

表明，孪生像倒是“原生像”了。



▲一般情况,  $\tilde{R}' \neq \tilde{R}$ ,

$\tilde{R}$	$\tilde{R}'$
(记录)	(照明)
平面波	球面波
球面波	平面波
平面波	平面波 (但不同方向)
球面波	球面波 (但不同聚散中心)

### (3) 小结

▲变换因子  $\tilde{T}_2$ 、 $\tilde{T}_3$  的作用等效于“一个薄棱镜”，或“一个薄透镜”，或“薄透镜+薄棱镜”，作用于  $\tilde{O}$  波、 $\tilde{O}^*$  波，这导致“原生物光波”和“孪生共轭波”的“移位”、“偏转”，以及相联系的“缩放”和“变形”。

▲角色转换——记录时参考光波的相因子，在再现时扮演透镜或棱镜的角色，对  $\tilde{O}$  波或  $\tilde{O}^*$  波产生影响，实施变换。这是一个值得回味的有趣的事情。

**波前**  $\longleftrightarrow$  **元件**

▲广义之，即使不是傍轴球面波， $A'_R$ 、 $A_R$  不是严格常数，它一般也是一个“慢变分布”——低频调制于  $\tilde{O}$  波 &  $\tilde{O}^*$  波，依然显示  $\tilde{O}$  波、 $\tilde{O}^*$  波的主要特征，再伴有弱“光噪声”。

▲再现时，产生两个虚像的可能性，或产生两个实像的可能性是存在的，取决于物距与等效焦距数值之比较。

▲神秘全息术的还俗

\*日常生活 平面镜成像 呈现 **真三维**。

\*余弦光栅的制备  $\approx$  全息记录（双束平面波干涉）

\*余弦光栅的衍射  $\approx$  全息再现（三束平面衍射波）

\*引出角放大率，当  $\lambda' \neq \lambda$

$$\sin \theta' = \frac{\lambda'}{\lambda} \sin \theta$$

● 全息图的观察（参见书 360 页）

全息图  $\approx$  “窗口”，

全息图有“可分割性”

即 部分全息图 可再现完整物波前，

这源于

全息照相系“点面对应”记录，

而透镜成像系“点对点”记录。

● 全息成像位置和横向放大率（参见书 361—364 页）

设物点  $O(x_0, y_0, z_0)$ ，参考波点源  $(x_1, y_1, z_1)$ ，照明波点源  $(x', y', z')$ 。

导出

再现 +1 级波点源  $O_{+1}(x_{+1}, y_{+1}, z_{+1})$  位置公式，

再现 -1 级波点源  $O_{-1}(x_{-1}, y_{-1}, z_{-1})$  位置公式。

## 7.2 各种全息图

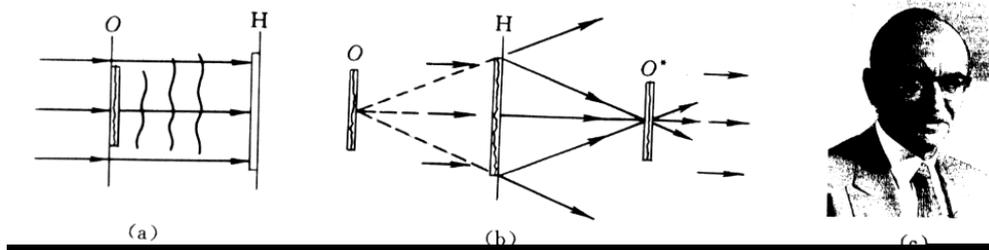
- 概述   •从共轴全息到离轴全息   •共面全息记录
- 傅里叶全息图与特征字符识别   •体全息图与白光再现
- 像面记录全息图   •一步彩虹全息图

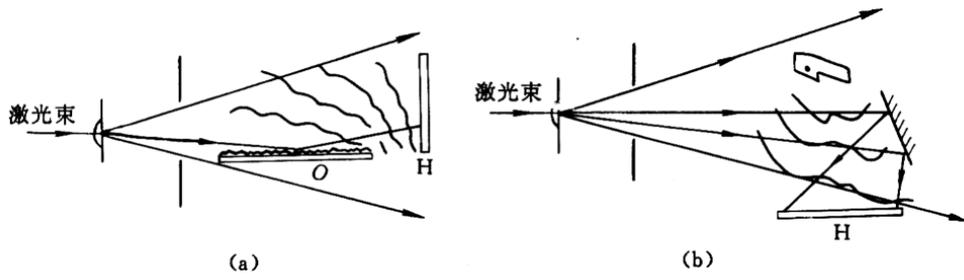
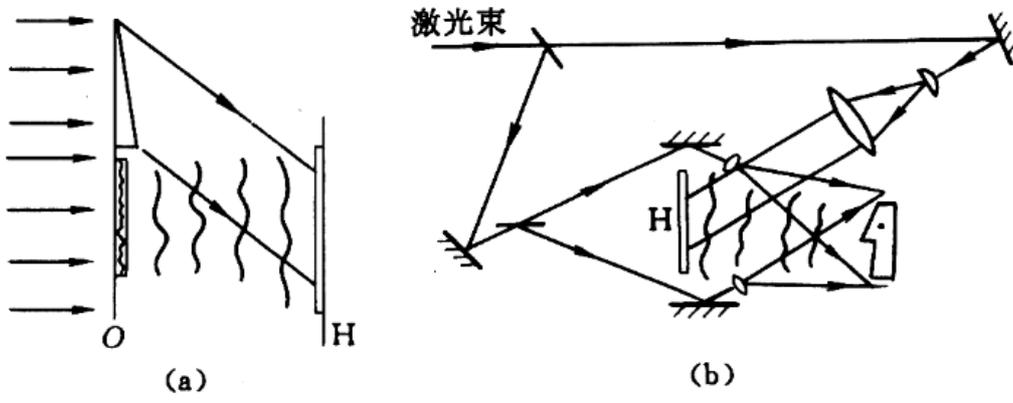
### ● 概述

全息图种类繁多，或因记录装置的光路和布局的不同，或由于对全息干版的处理工艺的不同而相区分。根据不同的分类方式，可有以下几种类别：

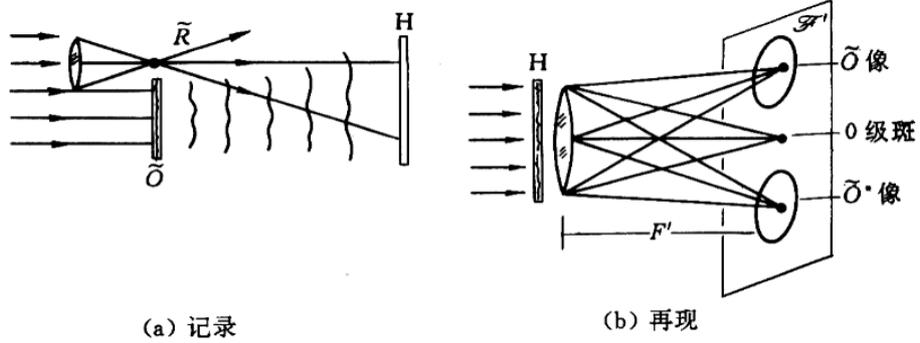
同轴全息图与离轴全息图；薄全息图与体全息图；同侧记录全息图与反侧记录全息图；振幅型全息图与相位型全息图及其彩虹全息图；菲涅耳全息图与夫琅禾费全息图及其傅里叶全息图；连续激光全息图与脉冲激光全息图；等等。

### ● 从共轴全息到离轴全息

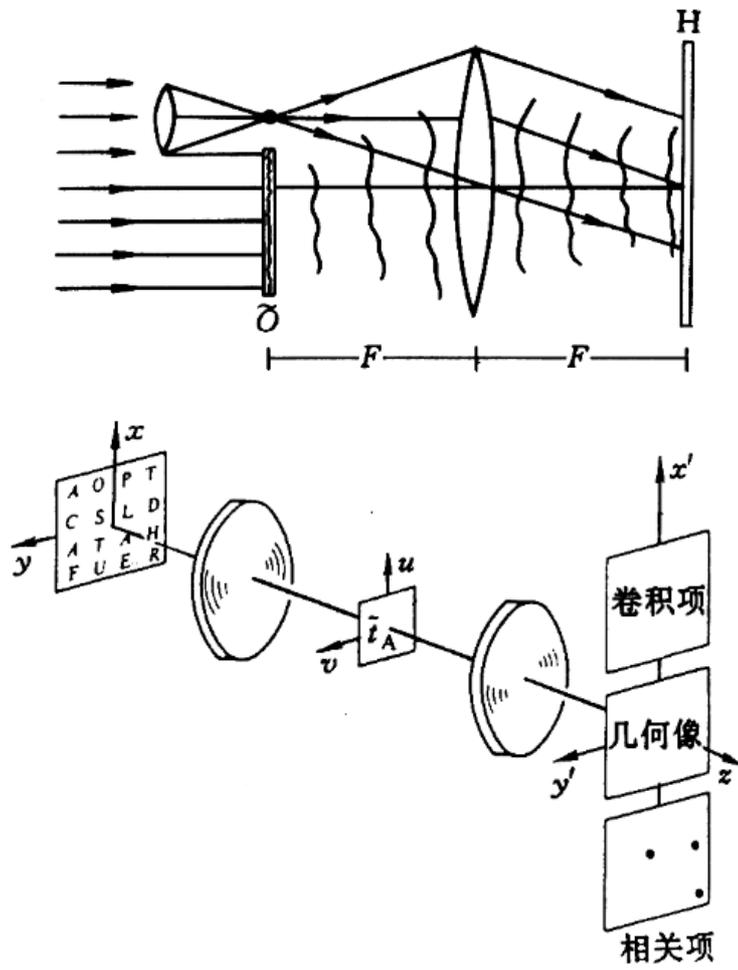




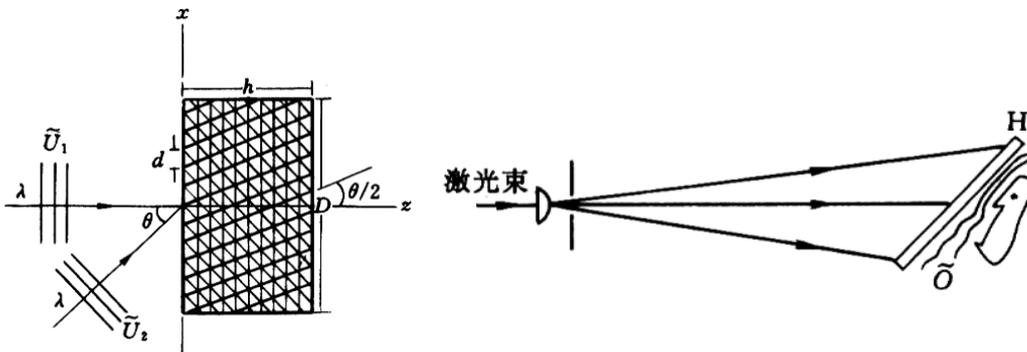
● 共面全息记录



● 傅里叶全息图与特征字符识别



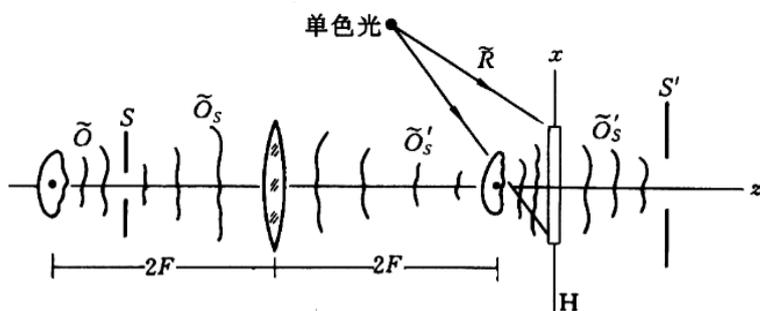
● 体全息图与白光再现



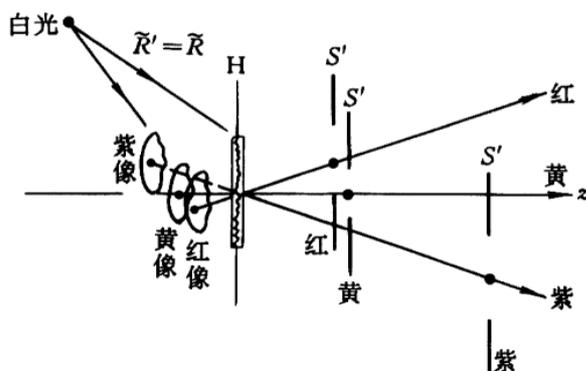
● 像面记录全息图

像面记录全息图也可以实现白光再现,这是因为它的再现像的位置,就在全息图版处或图版邻近区域,故对应各种色光的再现像之间的重叠一致性较好,亦即再现像的色模糊和像模糊较小,合成结果基本上呈现出与原物相似的三维白光图像。

● 一步彩虹全息图



(a) 单色光记录光路



(b) 白光再现——色选择性

当用白光照射这张全息图时，就能在不同观测方向，看到不同主色调的再现物像；当观察方向变动时，就先后看到五彩变换的图像，宛如彩虹。图 7.17 (b) 清晰地解释了彩虹全息图实现白光再现单色像的原理，从中看出那单狭缝所起的关键作用。白光中某一单色成分的光，经这全息图所生成的物像与缝像是成对出现的，而且两者的位移相反，比如紫光物像位移向上，而紫光缝像却位移向下。于是，观察者只能在下方一特定视线方向看到主调为紫色的再现像。同理，观察者在水平视线方向或上方某一特定方向，看到主调为黄色或红色的再现像。这里，我们设定黄色波长  $\lambda$  为全息记录时所采用的单色光波长。

### 7.3 全息应用简介

- 全息显示 ●模压彩色全息 ●全息干涉计量术 ●全息存储
- 超声、红外或微波全息 ●全息元件 ●全息学展望

(参阅书 371-374 页)

#### ★全息术发展的历史评述&展望

##### ▲1940' s 后期

*Gabor* 提出全息术原理——用 Hg 灯拍摄了一张全息图并再现。

*Gabor* 全息术系 共轴装置 单色光记录  
单色光再现

##### ▲1960' s 年代

(美国人) *Leith*

(苏联人) *Upatnieks*

} ⇒ 离轴全息装置

(苏联人) *Denisyuk* ⇒ 体全息——实现了白光再现

##### ▲1970' s 以后

Benton 的彩虹全息 (1969)

Cross 的复合全息 (1977)

亦均实现了 白光再现

这第三阶段，按 *Leith* 的说法是  
没有明确的起始日期，因为没有创造性的代表作。  
全息制品稳步地

走向艺术，美化生活。

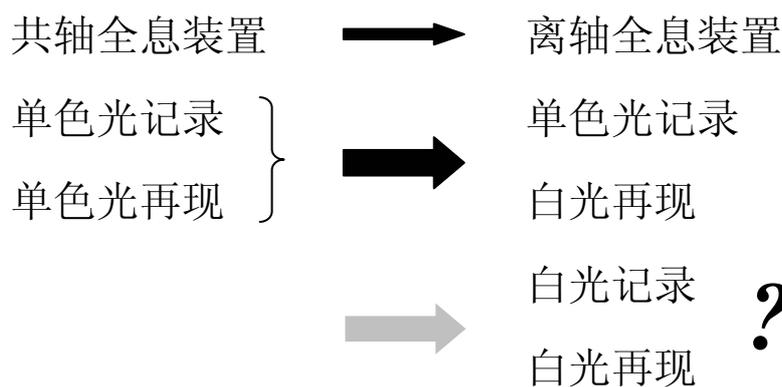
潜入商海——防伪商标

(*Anti counterfeiting*)

\* 总之，从科技发展的内在逻辑

& 实际应用的客观需求 看

全息术的发展进程



实现“白光记录、白光再现”的症结何在？

技术？材料——光功能器件？

(参见习题讨论题 7.4)