

第五章 傅里叶变换光学

第五节 全息照相

5.5 全息照相

5.5.1 全息照相概述

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

5.5.3 全息图的分类及实例

5.5.4 全息照相的应用

5.5.5 全息照相装置及实验注意事项

5.5.1 全息照相概述

全息照相的概念

“全息”一词源于希腊词 hōlos 和 grammar，在英文中用 Holography 表示，“Holo”即“完全”的意思，我国译为“全息”，意思是“全部信息”。

- Holograph
全息
- Holographic
全息照相的
- Holography
全息术
- Hologram
全息图

5.5.1 全息照相概述

全息照相的发展历史

设计初衷—提高电子显微镜的分辨率。

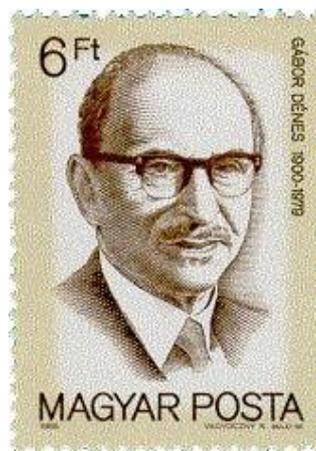
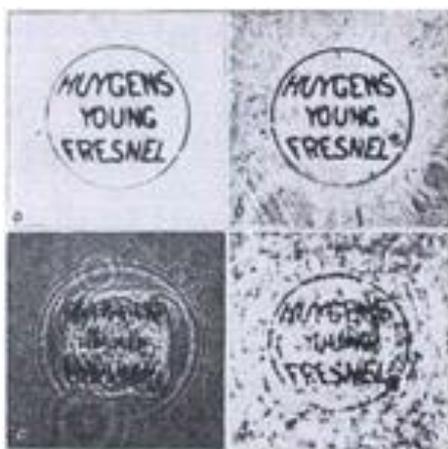
1948，Gabor提出，波前记录（Holography）

全息术是人类对“光信息”深刻理解的产物，是经典光学向现代光学过渡时期具有里程碑意义的研究成果，被公认为是20世纪最伟大的发明之一。



英籍匈牙利物理学家
Dennis Gabor
(1900 ~ 1979)

1971年诺贝尔物理学奖
(发明并发展全息照相法)



5.5.1 全息照相概述

全息照相的发展历史（续）

1960，激光出现，提供高亮度相干光源

1962年在美国密执安大学从事雷达工作的利思和乌巴特尼克斯两个人提出采用倾斜参考光束形成一个均匀的相干底衬即所谓离轴全息照相法,从而克服了共轴全息图的本质缺点。

他们于 1963年，首先做出了第一张成功的全息照相。



5.5.1 全息照相概述

全息照相的发展历史 (续)

- 法国物理学家李普曼发明了基于干涉现象的彩色照相术 (1891) , 获 1908年诺贝尔物理学奖。
- 1962年, 前苏联科学家丹尼苏克首次拍摄出了反射式全息图。
- 1969年Benton在全息图的碎片能再现物体完整像的启发下,提出了彩虹全息术,首次利用二步法制成了彩虹全息图,
- 1978年美籍华人陈选和杨振寰提出了一步彩虹全息,1977年Cross复合全息图(即多重全息图)制成。
- 1979年第一张彩色全息图问世。



法国 李普曼
(1845-1921)



丹尼苏克



Stephen Benton



5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

全息照相的基本机理

由物体表面发出或经物体表面反射的光波，携带着物体表面的信息，这些信息可以由物光波的波函数（复振幅分布）表示：

$$\tilde{O}(x, y) = O_0(x, y)e^{i\varphi_0(x, y)}$$

$O_0(x, y)$ 波前上各点的振幅分布，反映了物体表面各点的亮度信息；

$\varphi_0(x, y)$ 波前上各点的相位分布，反映了物体表面的纵向位置信息。

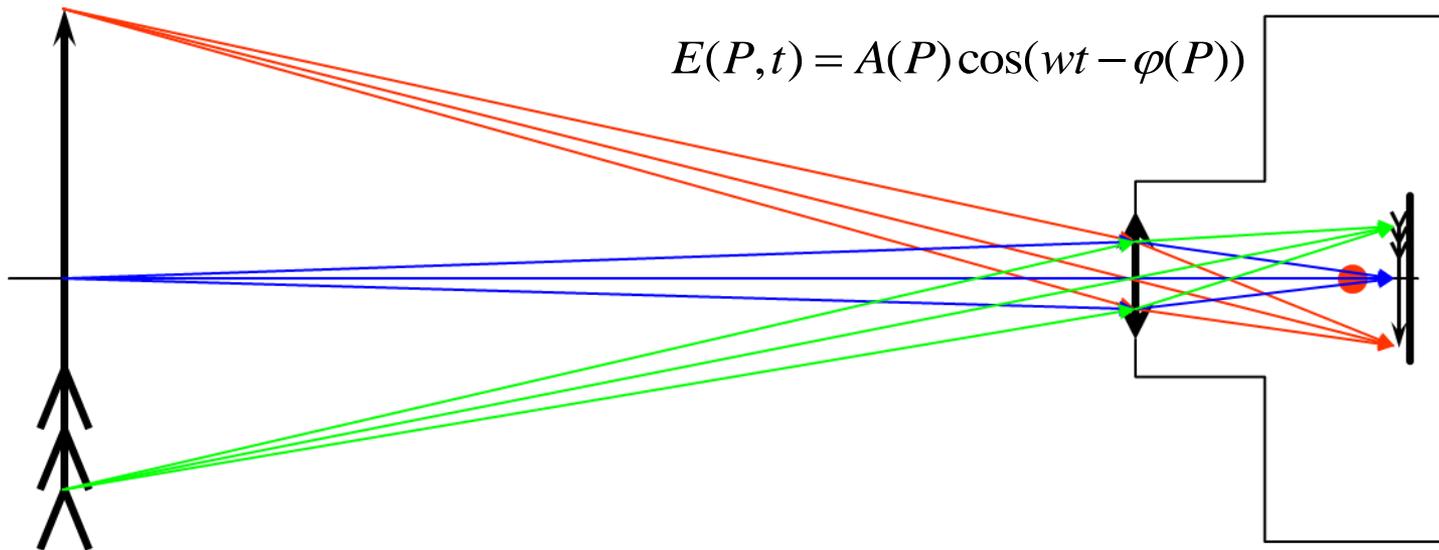
全息记录和显示：要记录或再现物体表面的全部信息，必须同时能够记录或再现出反映物体表面特征的光波场的振幅和相位信息。

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

全息照相的过程

全息照相的过程分为两步：记录、再现。

一、全息记录：



传统照相：底片记录光强，位相信息丢失

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

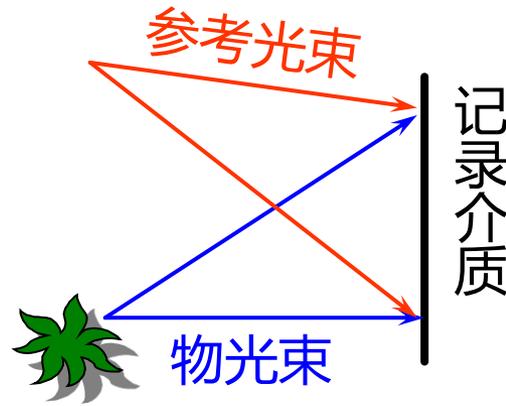
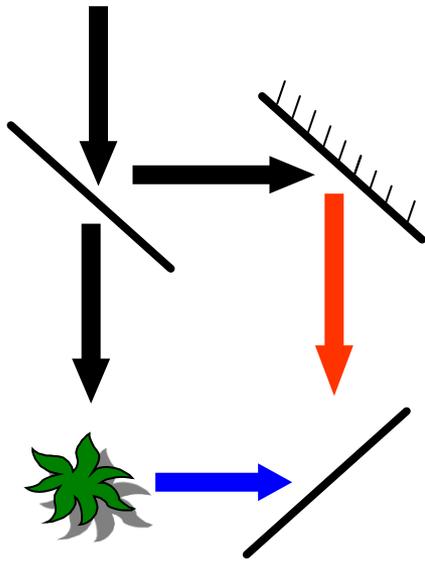
全息照相的过程 (续)

一、全息记录 (续)

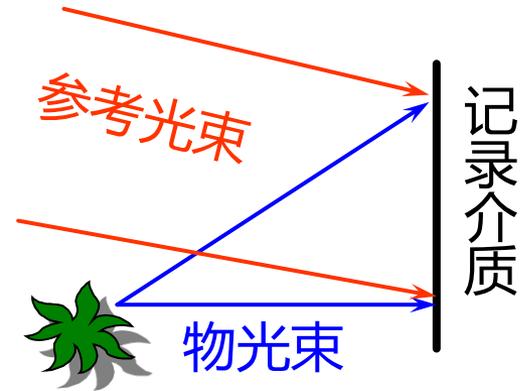
物光+参考光 \Rightarrow 干涉
 \Downarrow 底片记录

干涉图 (全息图) \longleftarrow 波前全息记录

振幅 位相 \longleftarrow 全部光信息



球面波照明



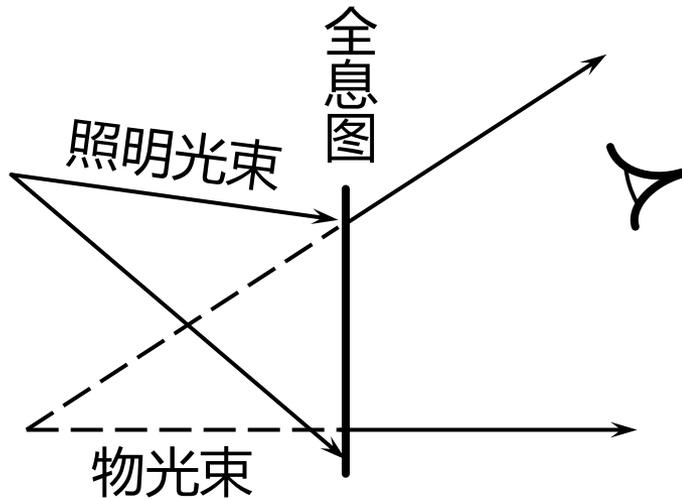
平面波照明

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

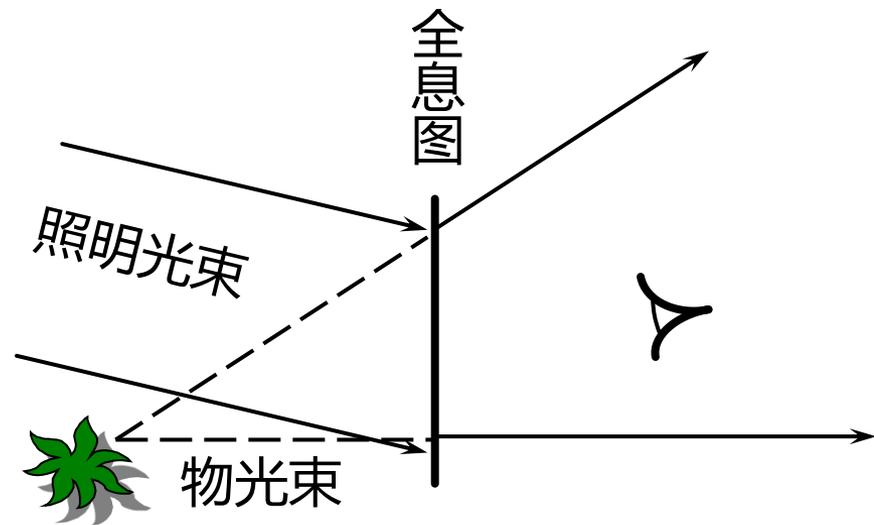
全息照相的过程 (续)

二、波前再现

照明光+全息图 \Rightarrow 衍射



球面波照明



平面波照明

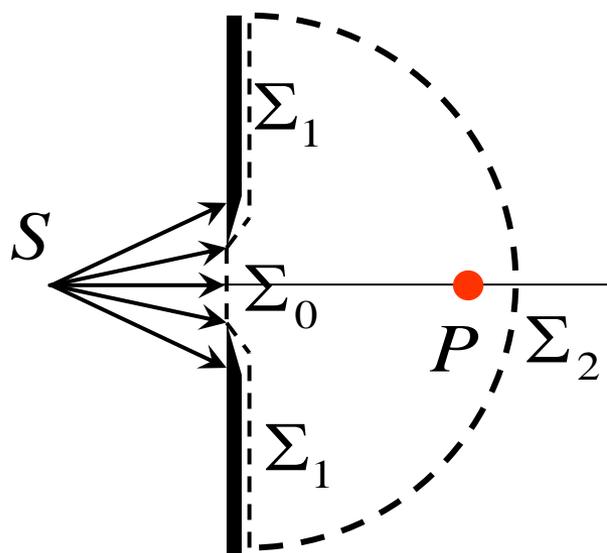
5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

惠更斯—费涅耳原理的实质

——无源空间边值定解：

无源空间中的光场分布由边界条件（波前）唯一确定。

再现波前 $\Downarrow \Rightarrow$ 再现物光波



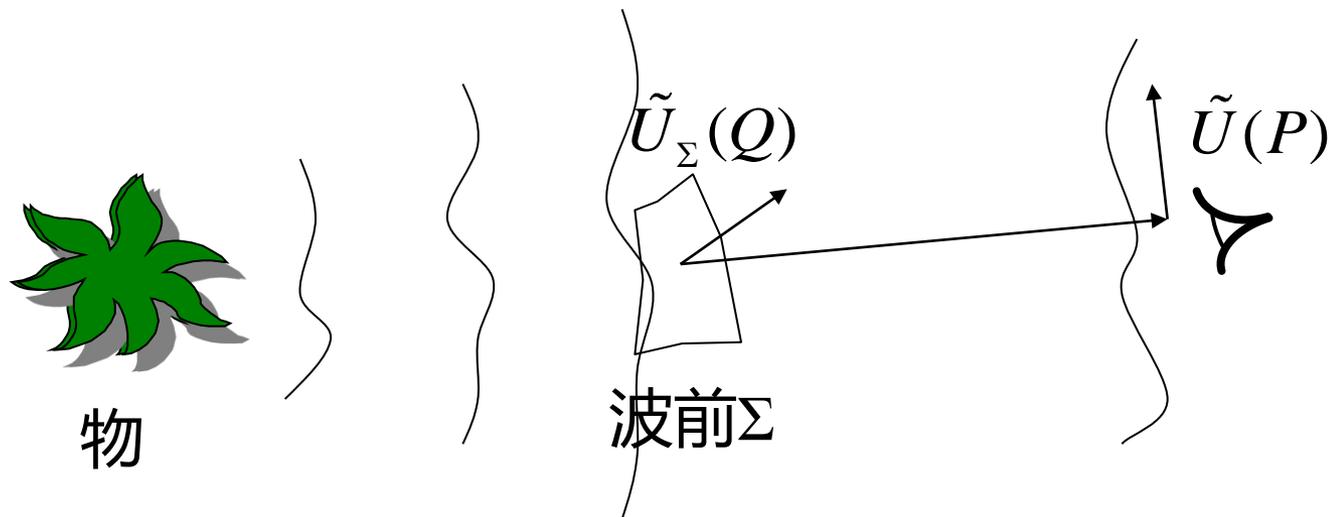
$$\tilde{U}(P) = \frac{-i}{2\lambda} \iint_{(\Sigma)} (\cos \theta_0 + \cos \theta) \tilde{U}_0(Q) \frac{e^{ikr}}{r} d\Sigma$$

被波前 Σ 隔开的无源场空间中任意点 P 的震动 $\tilde{U}(P)$ 由波前的 $\tilde{U}_0(Q)$ 分布唯一确定

1. $\tilde{U}_0(Q)$ 改变 $\Downarrow \Rightarrow \tilde{U}(P)$
2. 仅需波前再现，即可确定唯一的 $\tilde{U}(P)$

5.5.2 全息照相的原理和特点

惠更斯—费涅耳原理的实质



物发出光波到达P点，复振幅 $\tilde{U}(P) \Rightarrow$ 人眼感受到物的存在
 光源 \Rightarrow 波前函数 $\tilde{U}_\Sigma(Q) \Rightarrow P$ 点 $\tilde{U}(P) \Rightarrow$ 人眼感受到物的存在
 只有波前函数 $\tilde{U}_\Sigma(Q) \Rightarrow P$ 点 $\tilde{U}(P) \Rightarrow$ 人眼感受到物的存在
 只要记录并再现波前函数 $\tilde{U}_\Sigma(Q) \Rightarrow \tilde{U}(P) \Rightarrow$ 再现物和像

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

波前的全息记录

第一步：物光波 U_O 与参考光波 U_R 在记录介质上相干叠加

物光波：

$$\tilde{U}_O(Q) = \sum_{\text{物点}} u_n(Q) = A_O(Q) e^{i\varphi(Q)}$$

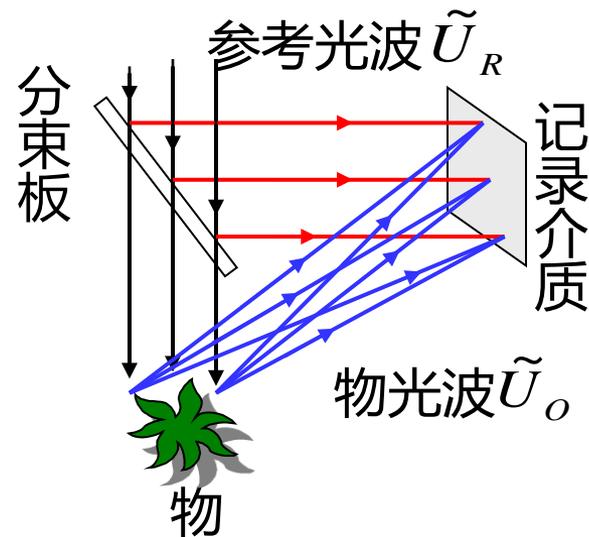
与参考光 $\tilde{U}_R = A_R e^{i\varphi_R}$ 干涉：

复振幅分布

$$\tilde{U}(x, y) = \tilde{U}_O + \tilde{U}_R = A_O e^{i\varphi_O} + A_R e^{i\varphi_R}$$

光强分布

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |\tilde{U}(x, y)|^2 = (\tilde{U}_O + \tilde{U}_R)(\tilde{U}_O^* + \tilde{U}_R^*) \\ &= A_O^2 + A_R^2 + \tilde{U}_O \tilde{U}_R^* + \tilde{U}_O^* \tilde{U}_R \end{aligned}$$



5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

波前的全息记录

第二步：线性冲洗得到全息图

经过线性的显影定影处理，介质的透过率函数与记录过程中的光强函数是线性关系

$$I(x, y) = A_O^2 + A_R^2 + \tilde{U}_O \tilde{U}_R^* + \tilde{U}_O^* \tilde{U}_R$$

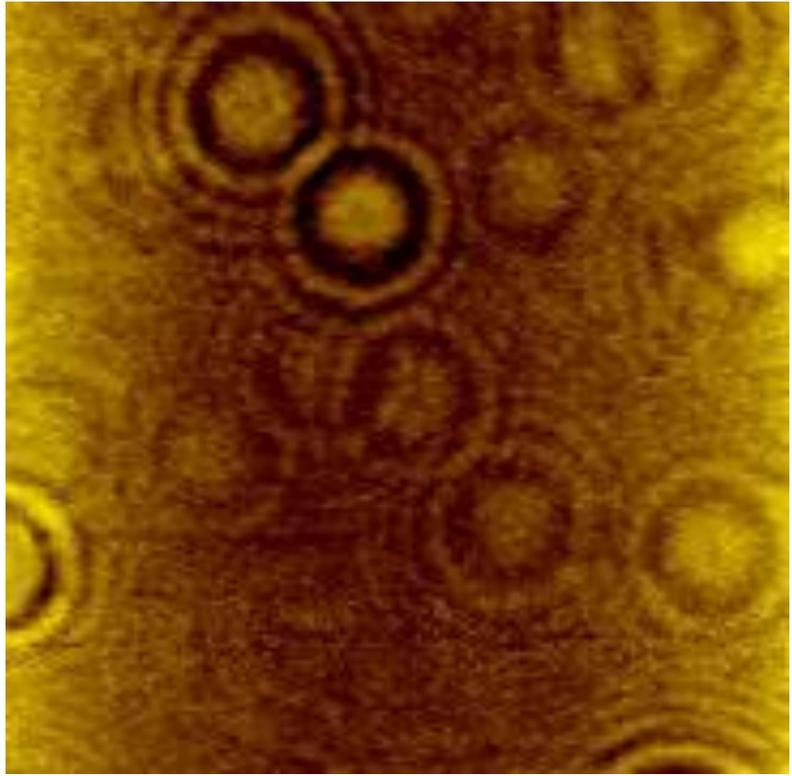
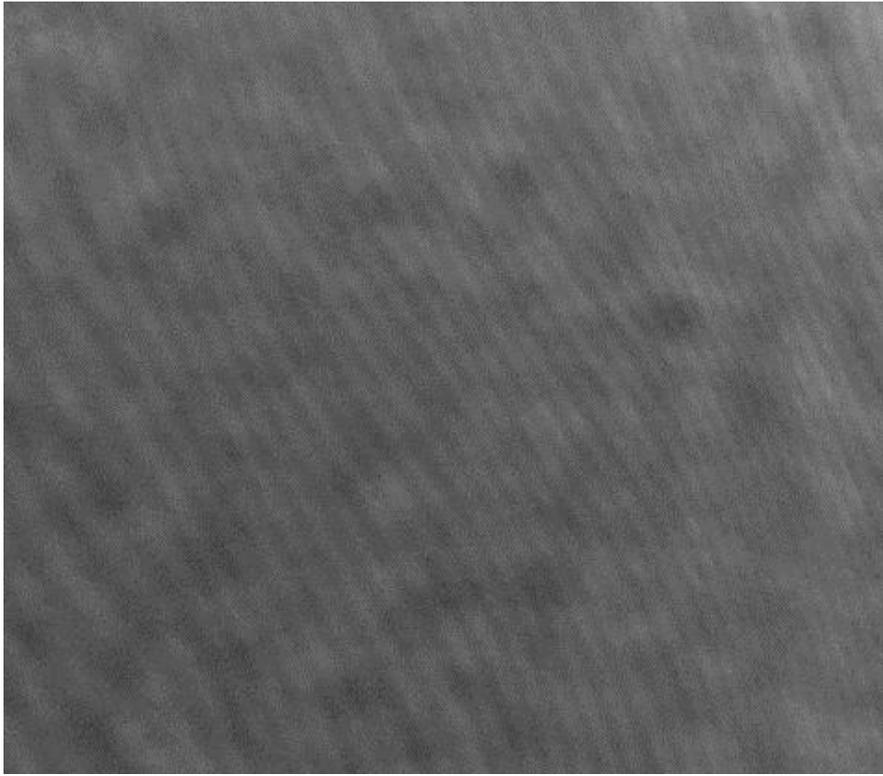
$$\begin{aligned} t(x, y) &= t_0 + \beta I(x, y) = t_0 + \beta(A_O^2 + A_R^2) + \beta(\tilde{U}_O \tilde{U}_R^* + \tilde{U}_O^* \tilde{U}_R) \\ &= [t_0 + \beta(A_O^2 + A_R^2)] + \beta A_O A_R [e^{i(\varphi_O - \varphi_R)} + e^{-i(\varphi_O - \varphi_R)}] \end{aligned}$$

得到的图片，称作**全息图**。

一张全息图**就**是一张干涉图样，是物光波与参考光波的干涉条纹分布的照片。

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

波前的全息记录



Photograph of a hologram in front of a diffuse light background – $8 \times 8\text{mm}$

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

物光波的再现

用具有相干性的照明光波 $\tilde{U}'_R = A'_R e^{i\varphi'_R}$ 照射全息图。

透射光为

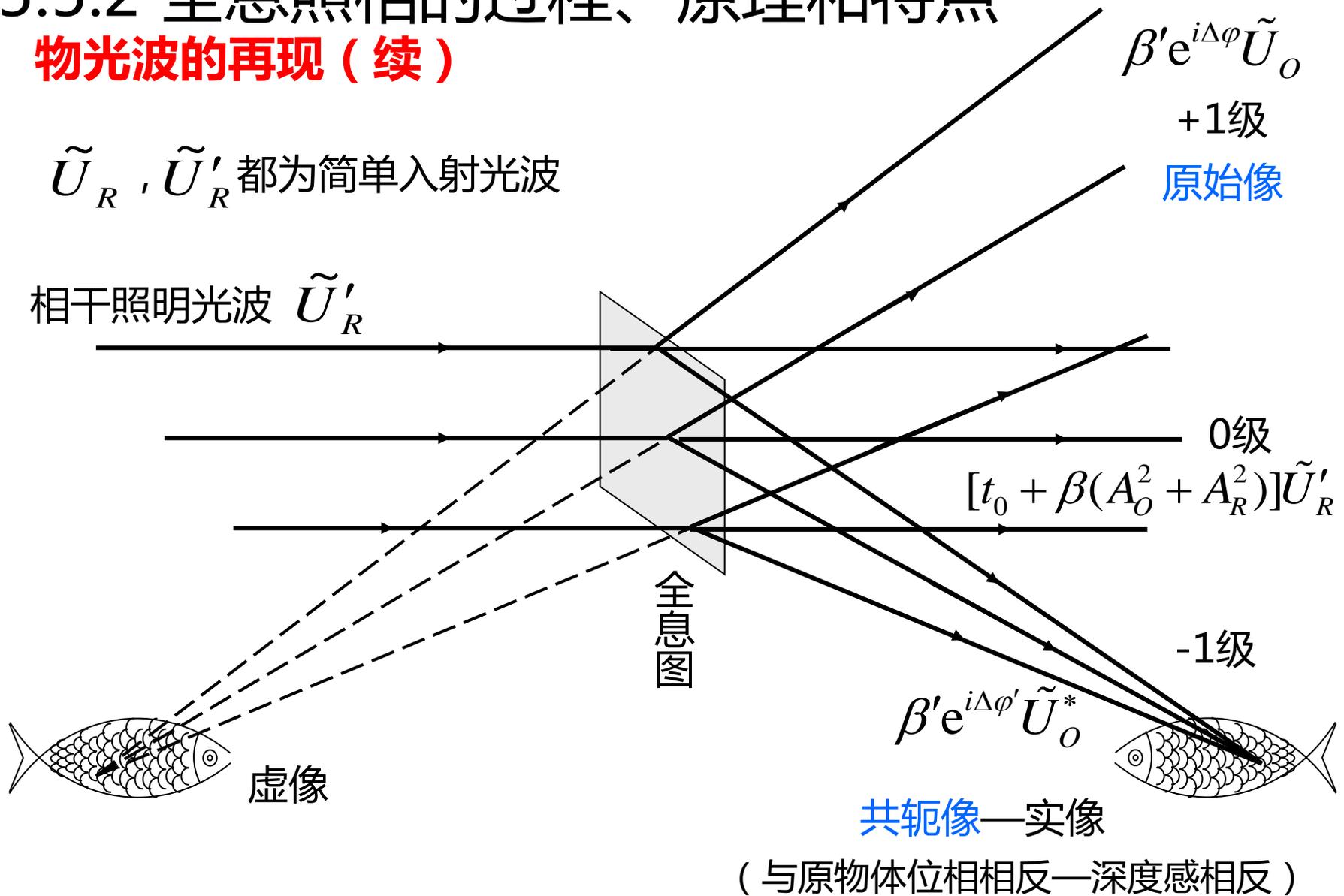
$$\begin{aligned}
 \tilde{U}_T &= \tilde{U}'_R \tilde{t}(x, y) = A'_R e^{i\varphi'_R} t(x, y) \\
 &= A'_R e^{i\varphi'_R} \{ [t_0 + \beta(A_O^2 + A_R^2)] + \beta A_O A_R [e^{i(\varphi_O - \varphi_R)} + e^{-i(\varphi_O - \varphi_R)}] \} \\
 &= A'_R [t_0 + \beta(A_O^2 + A_R^2)] e^{i\varphi'_R} \rightarrow [t_0 + \beta(A_O^2 + A_R^2)] \tilde{U}'_R \quad \text{0级} \\
 &\quad + \beta A_O e^{i\varphi_O} A_R A'_R e^{i(\varphi'_R - \varphi_R)} \rightarrow \beta' A_O e^{i\varphi_O} e^{i\Delta\varphi} \rightarrow \beta' e^{i\Delta\varphi} \tilde{U}_O \quad +1\text{级} \\
 &\quad + \beta A_O e^{-i\varphi_O} A_R A'_R e^{i(\varphi'_R + \varphi_R)} \rightarrow \beta' A_O e^{-i\varphi_O} e^{i\Delta\varphi'} \rightarrow \beta' e^{i\Delta\varphi'} \tilde{U}_O^* \quad -1\text{级}
 \end{aligned}$$

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

物光波的再现 (续)

$\tilde{U}_R, \tilde{U}'_R$ 都为简单入射光波

相干照明光波 \tilde{U}'_R



5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

物光波的再现（续）

附加相因子及其作用

考察 $\beta'e^{i\Delta\varphi}\tilde{U}_o$ 和 $\beta'e^{i\Delta\varphi'}\tilde{U}_o^*$

附加相因子 $e^{i\Delta\varphi}$ 和 $e^{i\Delta\varphi'}$ 的作用：使像的位置和大小发生变化。

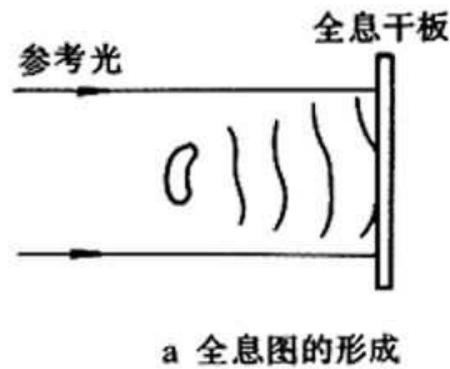
去除相因子的条件

1. R 和 R' 都是正入射的平面波， $\varphi_R = \varphi'_R = 0$ ，+1、-1级都无附加相因子。
2. R' 波和 R 波相同， $\varphi'_R = \varphi_R$ ，+1级无附加相因子，-1级附加 $e^{i2\varphi_R}$
3. R' 是 R 的共轭波， $\varphi'_R = -\varphi_R$ ，-1级无附加相因子，+1级附加 $e^{-i2\varphi_R}$

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

物光波的再现 (续)

共轴全息与离轴全息



样品为一透明的振幅型薄片，透过率函数为

$$t(x, y) = t_0 + \Delta t(x, y)$$

提供了相干背景参考光

包含样品信息

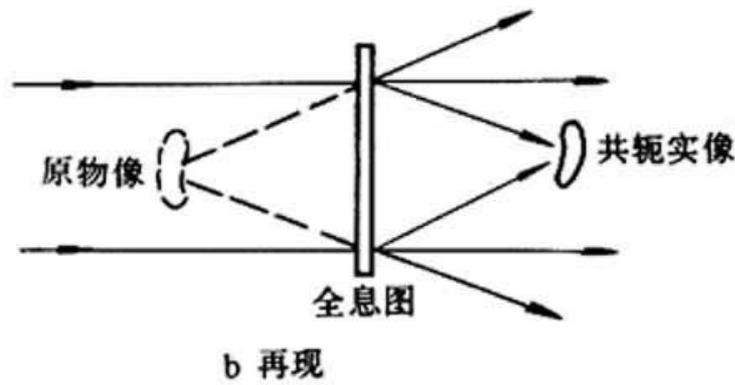
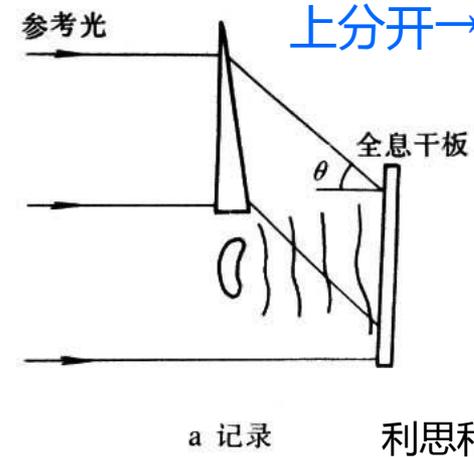


图 2 同轴全息图的形成和再现

为使0, ±1级在空间上分开 → 离轴全息



利思和乌巴特尼克斯 1962年提出。

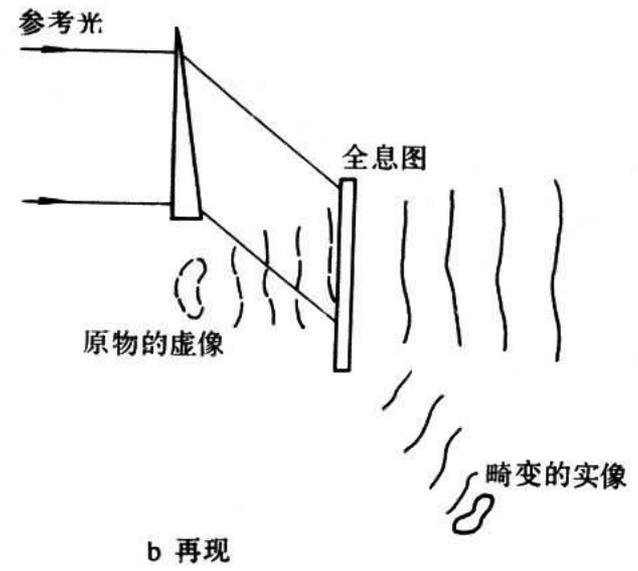
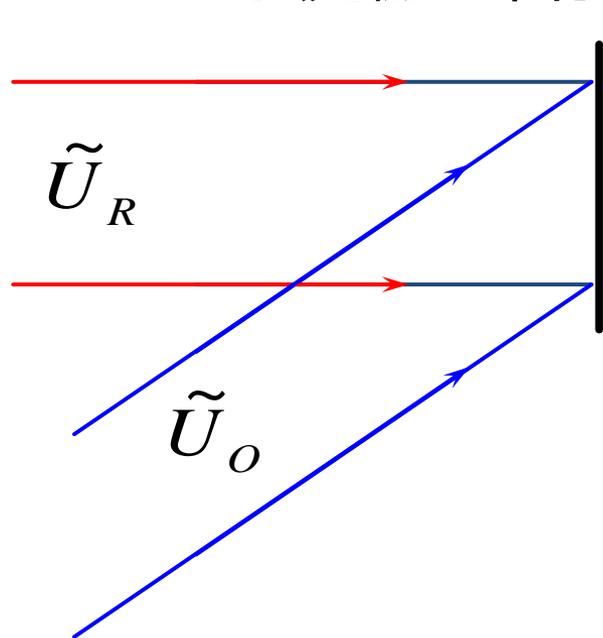


图 3 离轴全息图的形成和再现

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

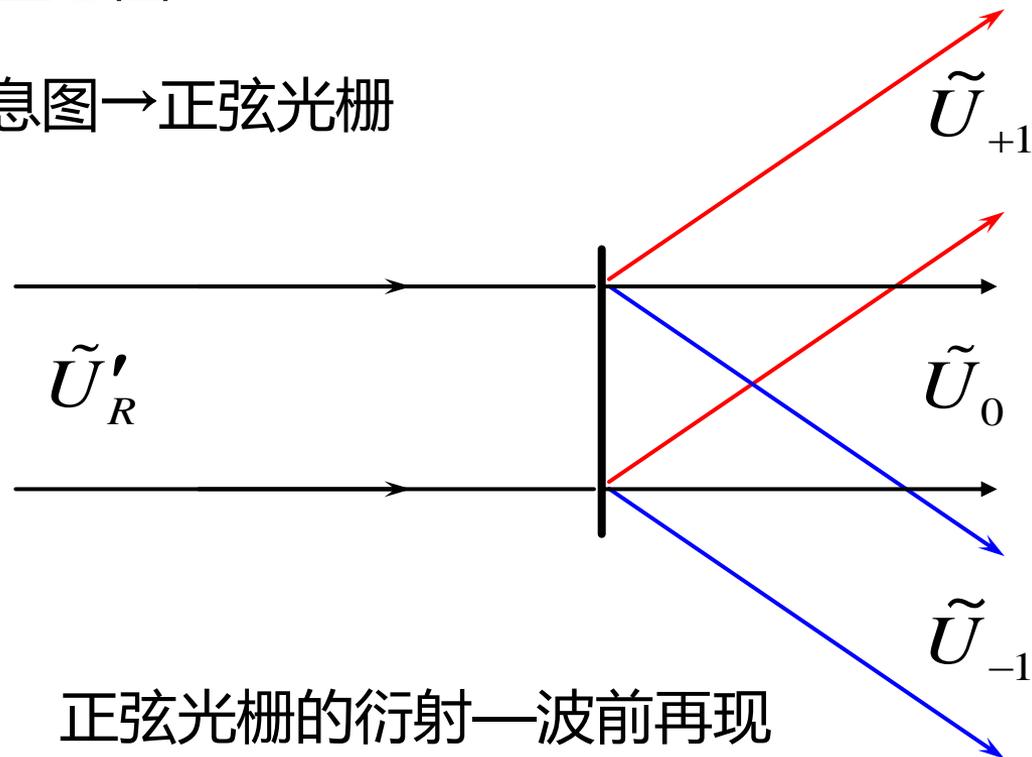
正弦光栅与全息图的关系

正弦光栅 → 平行光的全息图



正弦光栅的制备—波前记录

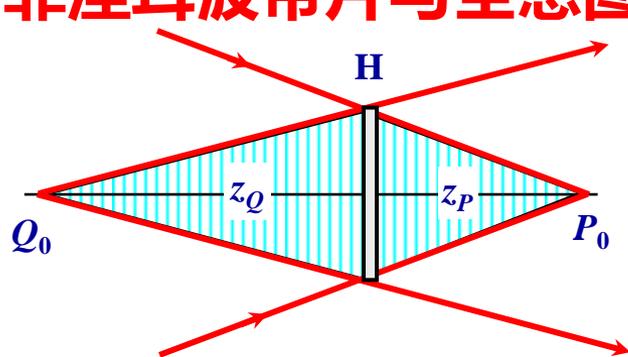
全息图 → 正弦光栅



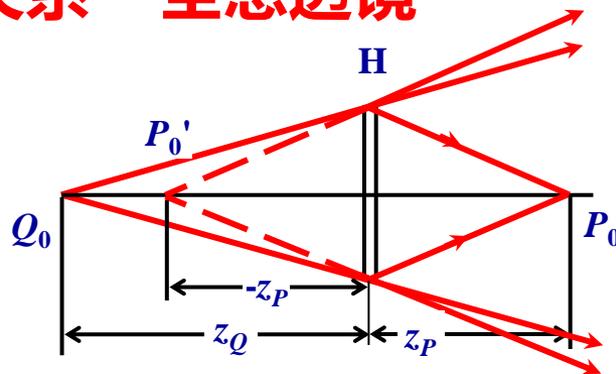
正弦光栅的衍射—波前再现

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

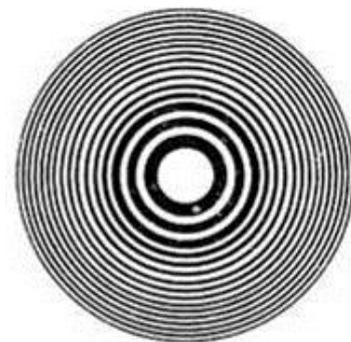
菲涅耳波带片与全息图的关系——全息透镜



全息透镜制作原理



全息透镜成像原理



图样

制作：两束球面波或一束球面波和一束平面波干涉得到的全息图。

衍射特性：在发散球面波垂直照射下，衍射光波由三部分构成：直透的0级衍射、会聚的+1级衍射和发散的-1级衍射。

焦距： $\frac{1}{f_k'} = \frac{1}{f_k} = j\mu \left(\frac{1}{z_Q} + \frac{1}{z_P} \right)$ j : 衍射级次, μ : 再现照明光波与记录光波波长之比。

特点：波长不同，焦点位置和焦距不同。因此，全息透镜存在非常大的色散性质，只能用于单色光成像。

实例：记录牛顿环或等倾干涉图样的底片，就是一个全息透镜。

特例：若两束记录光波中，一束为平面波，另一束为球面波，则所得全息透镜的焦距等于干版到会聚球面波顶点间的距离。

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

线性和二次位相变换函数的作用

附加相因子 → 位相型屏函数

→ 类似透镜、棱镜

例：共面照明全息

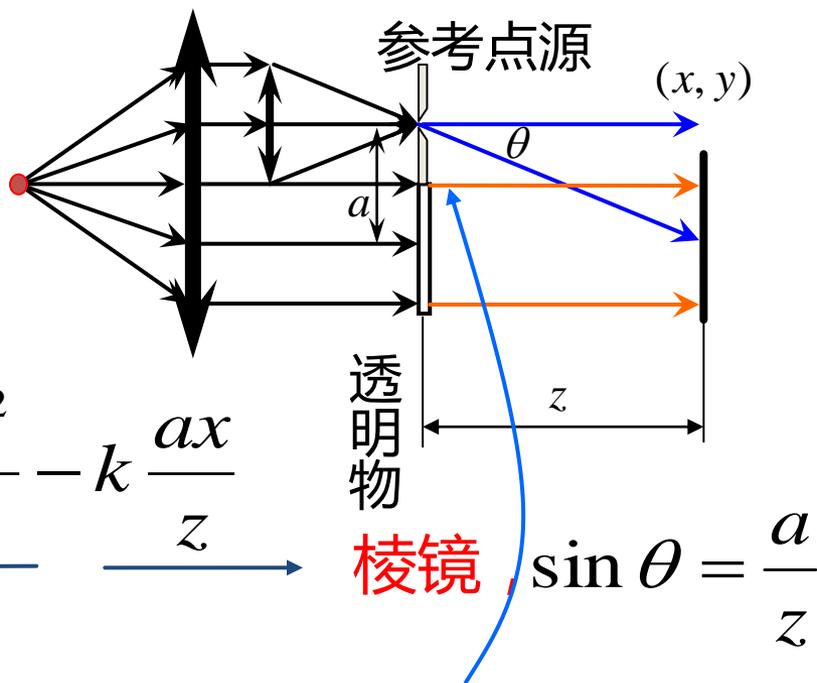
$$\begin{cases} \tilde{U}_{+1} = \beta A'_R A_R e^{i(\varphi'_R - \varphi_R)} \tilde{U}_0 \\ \tilde{U}_{-1} = \beta A'_R A_R e^{i(\varphi'_R + \varphi_R)} \tilde{U}_0^* \end{cases}$$

\tilde{U}_R 离轴球面波：

$$\varphi_R = k \frac{a^2 + x^2 + y^2}{2z} - k \frac{ax}{z}$$

透镜, $F=z$

\tilde{U}'_R 正入射平面波： $\varphi'_R = 0$



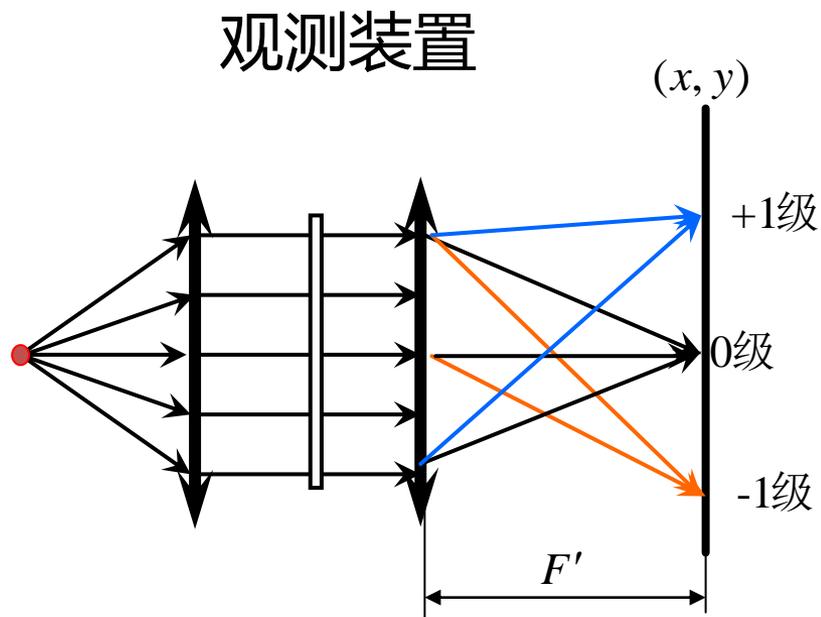
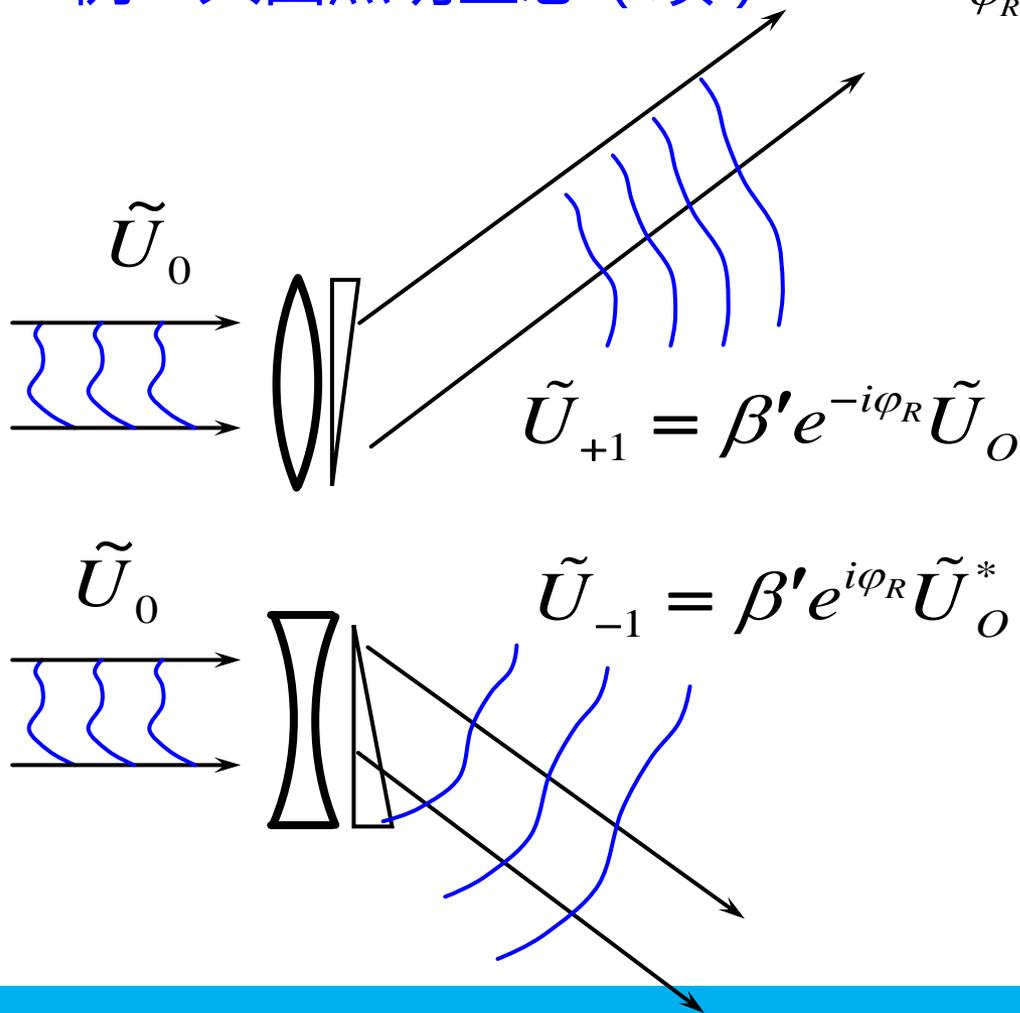
共面的含义：参考球面光波的光束中心与透明物共处于一个平面

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

线性和二次位相变换函数的作用

例：共面照明全息（续）

$$\varphi_R = k \frac{a^2 + x^2 + y^2}{2z} - k \frac{ax}{z}$$

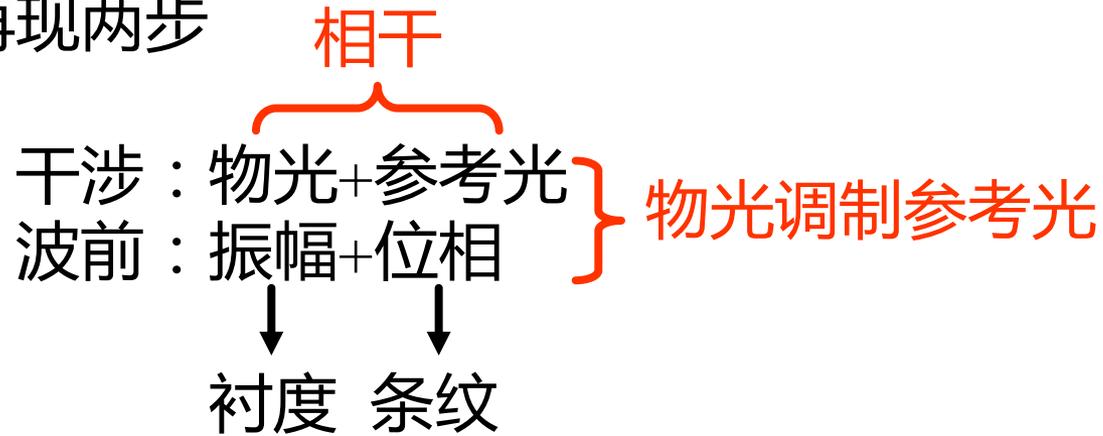


5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

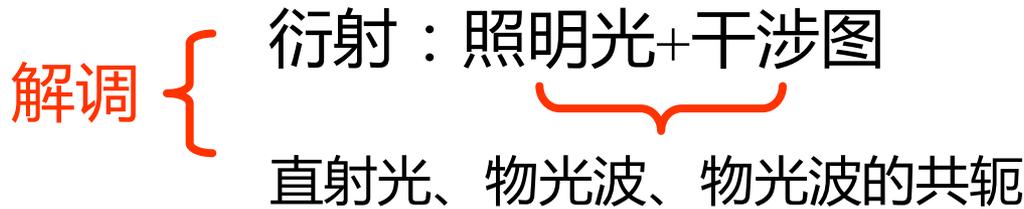
全息照相原理的小结

一、记录、再现两步

二、记录



三、再现



四、原理

几何光学→波动干涉、衍射
边界条件定解

5.5.2 全息照相的过程、原理和特点

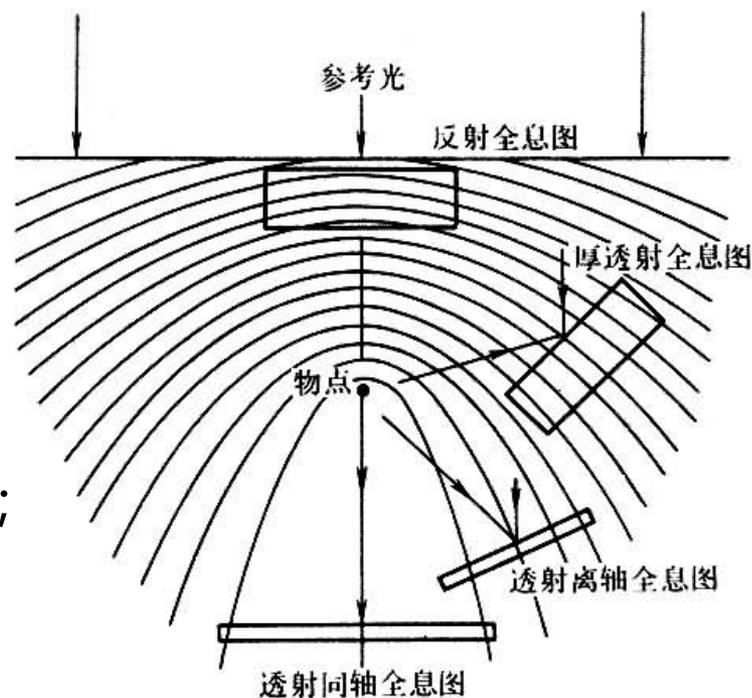
全息照相的特点

- (1) 用特定的单色光照射时，能在特定的方向和范围内再现物光束。
- (2) 全息照片的每一部分都记录了整个物体各部分的全部信息。只是随着该部分尺寸的减小（相当于通光孔径减小），再现像的噪声增大，清晰度降低。
- (3) 全息照片无正负之分，黑白相反时观察效果相同。全息照片易于复制。
- (4) 一张全息照片可分别记录几个物光波，可储存信息量比普通照片多。
- (5) 一张全息照片可对同一物体用同一参考光束进行两次曝光，显示其中的微小差别。

5.5.3 全息图的分类及实例

全息图的分类

1. 根据记录媒质的厚度与条纹间距之比, 分为**薄**全息图和**厚**全息图 (体全息) ;
2. 根据复振幅透过率的调制变量的不同, 分为**振幅型**全息图和**位相型**全息图 ;
3. 根据记录时物光和参考光的方位情况, 分为**同轴**全息图和**离轴**全息图 ;
4. 根据记录时物光和参考光在干版的同侧还是两侧, 可分为**透射**全息图和**反射**全息图 ;
5. 根据记录物体与干版的关系, 分为**菲涅耳型**、**夫琅和费型**、和**傅里叶型**全息图 ;
6. 根据制作和重现时所用光源的性质, 分为**白光**和**单色激光**全息图 (连续激光和脉冲激光) 等等。



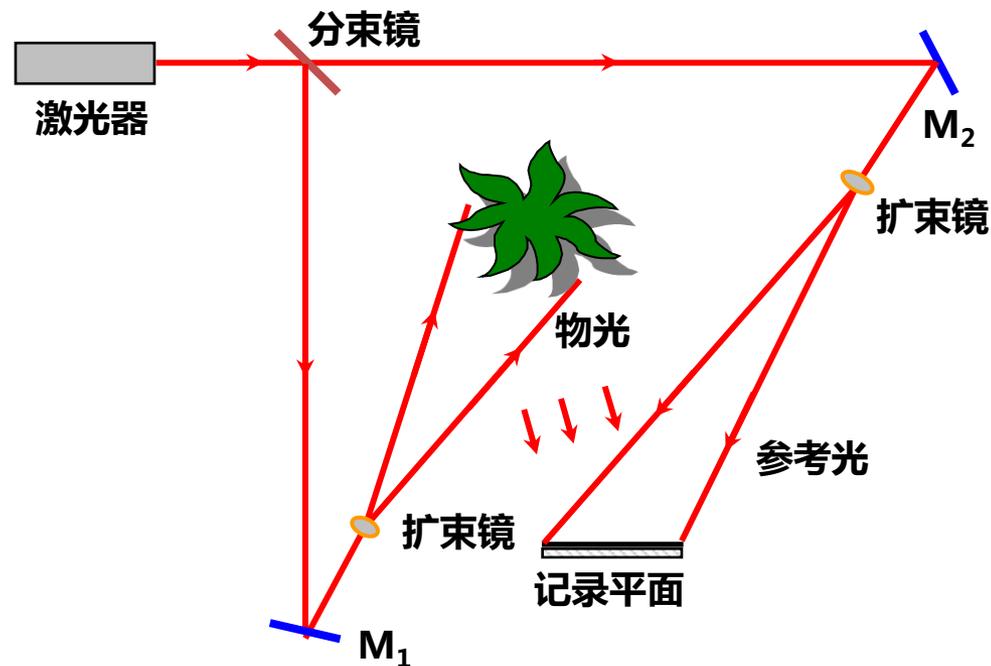
几种点源全息图的记录位置

5.5.3 全息图的分类及实例

菲涅耳全息图

特点：记录平面与物体表面之间相距较近。物体表面的散射光通过菲涅耳衍射到达记录面，与参考光干涉。

物光波：要求为漫反射光波。当物体表面光滑时，需要使照明光波先透过一块漫射屏（如毛玻璃）后再投射到物体表面上。



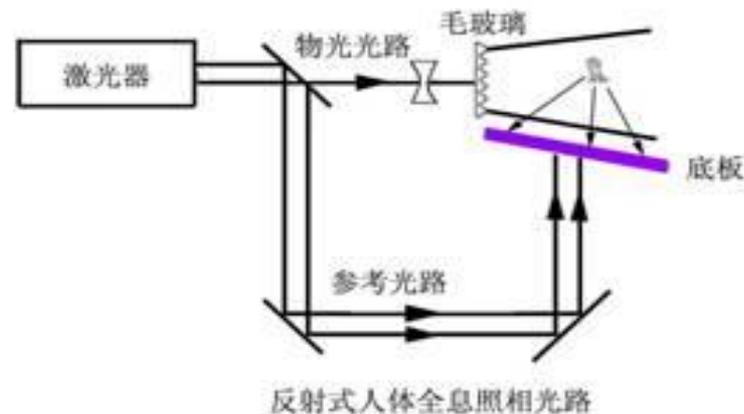
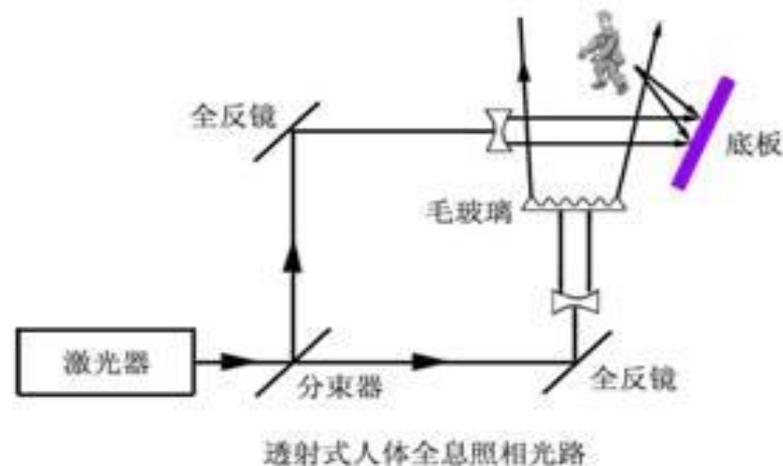
菲涅耳全息图的实验记录光路

5.5.3 全息图的分类及实例

透射式全息与反射式全息

区别

- **拍摄光路不同**：透射全息拍摄时物光与参考光在干版的同一侧，反射全息拍摄时物光与参考光在干版的两侧。
- **再现光源不同**：透射全息用激光再现，反射全息的反射光源可以是激光也可以用白光---日光灯或太阳光。
- **再现方法不同**：透射式再现光与人眼在干版两侧，反射式再现光与人眼在干版的同侧。
- **主要应用场景不同**：透射式景深较好，多用于大型展览；反射式景深较小，主要用于防伪商标、人像拍摄等等



5.5.3 全息图的分类及实例

透射式全息与反射式全息



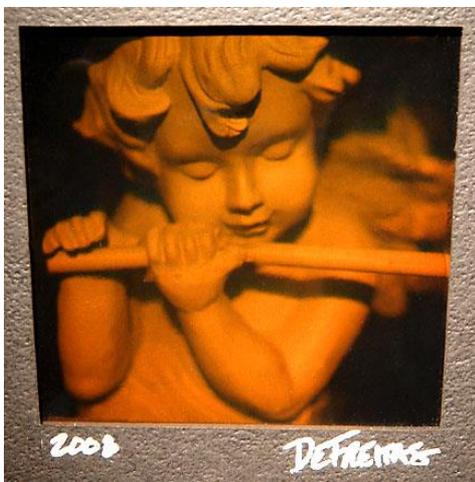
透射式



透射式



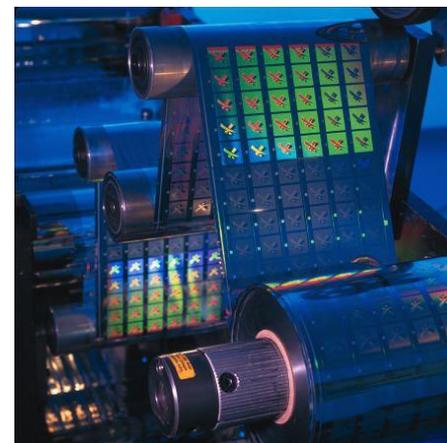
反射式



反射式



反射式



反射式

5.5.4 全息照相的应用

全息照相的主要应用领域

- 1.全息显示
- 2.模压全息
- 3.全息干涉技术
- 4.全息光学元件
- 5.全息信息存储

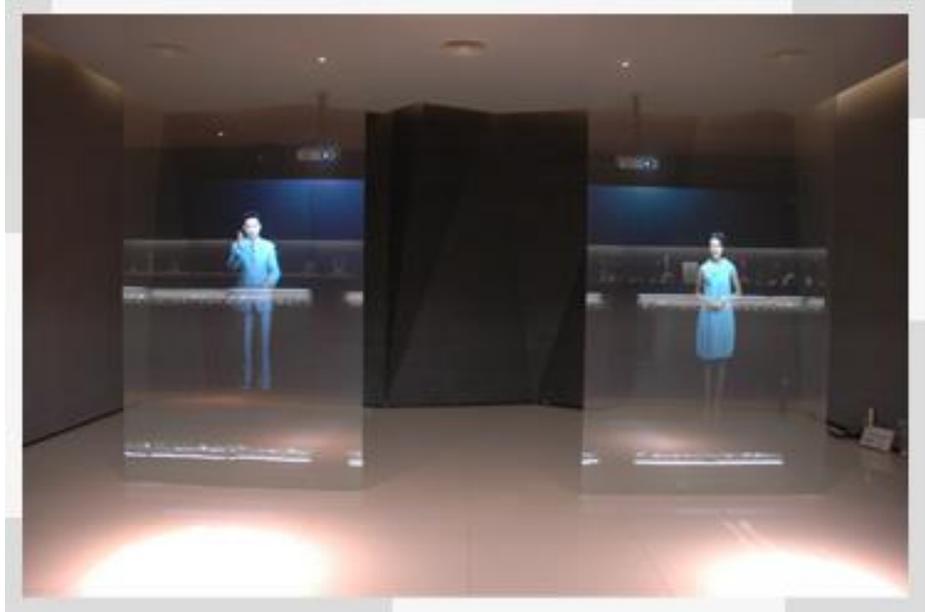
5.5.4 全息照相的应用

全息电影和全息电视

目前全息投影的表现形式主要有两种：立体全息投影和单面全息投影。



立体全息投影



单面全息投影

5.5.4 全息照相的应用

全息电影和全息电视

2008年美国总统大选的新闻报道现场，美国有线电视新闻网(CNN)运用全息投影技术，将身处异地的CNN女主持Jessica Yellin的“全息影像”出现在直播间里，与著名主持人Wolf Blitzer面对面交谈，而实际上她本人远在芝加哥。令人称奇。



总共动用了35部高清摄像机，从各不同角度对主持人进行拍摄，图像素材进而被输送到20台电脑中进行处理合成，形成的影像通过37英寸等离子电视预览后即传输到演播现场，由高清投影机实现人像再现过程。

此全息非彼全息。

5.5.4 全息照相的应用

全息电影和全息电视

日本世嘉公司

《2010初音未来日的感谢祭》演唱会



采用德国Sax 3D公司的3D全息透明屏，该屏幕可以调节透明度，通过调节屏幕中的局部粒子浓度显示出半透明效果并成像。

周杰伦与“邓丽君”的隔空对唱



5.5.4 全息照相的应用

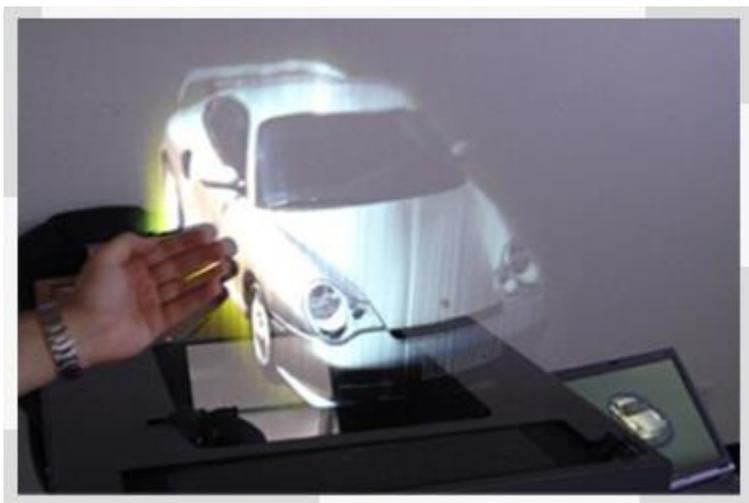
全息电影和全息电视



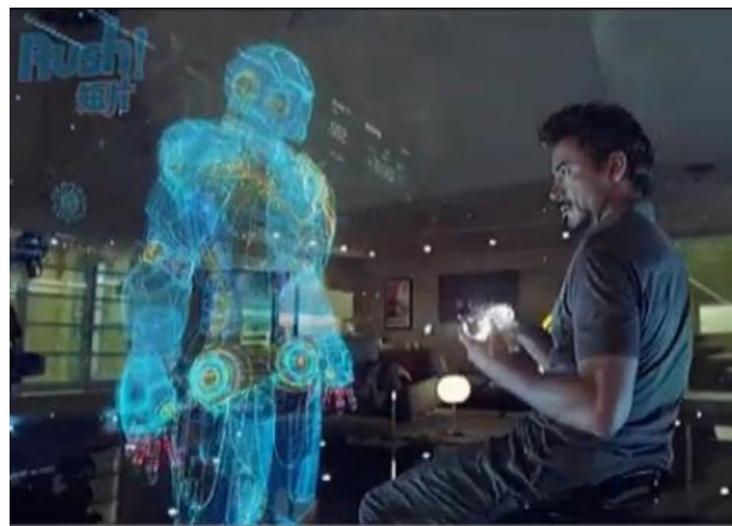
5.5.4 全息照相的应用

全息电影和全息电视

空气成像也称空气雾幕立体成像，空中立体成像，雾屏成像等。空气屏幕系统可以是水蒸气组成的雾墙或者是烟雾等。

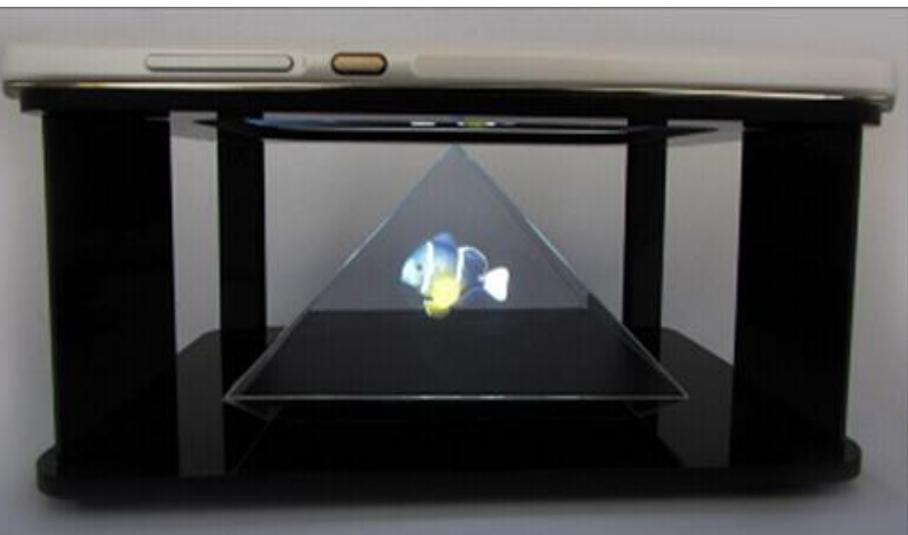


图片摘自数虎图像公司

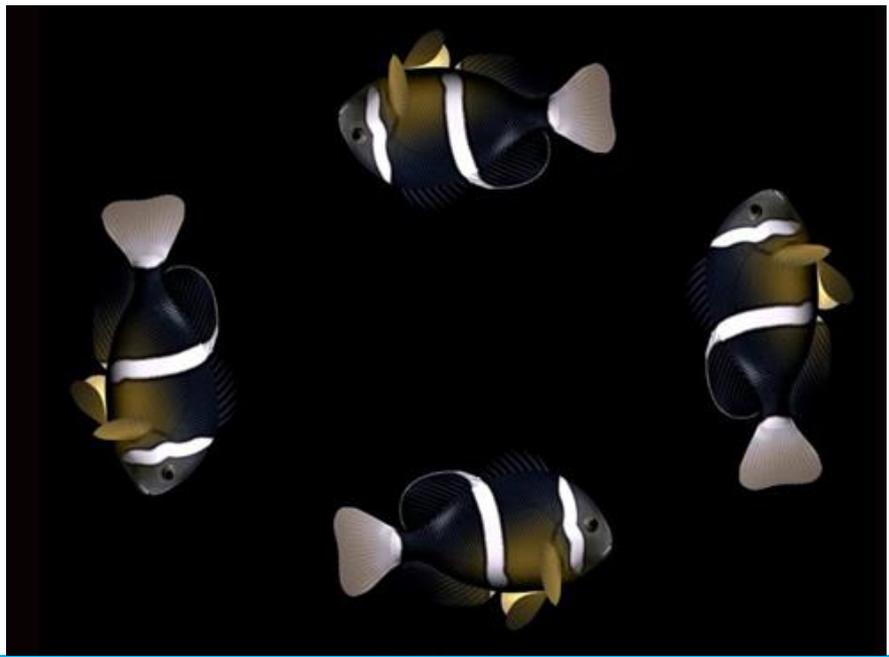
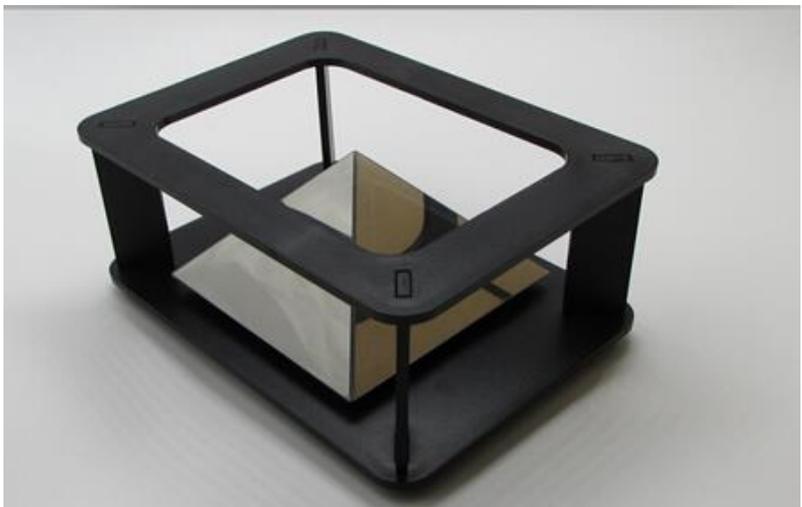


5.5.4 全息照相的应用

伪全息



全球效果最好的一款
手机全息投影仪
采用进口高清膜+全息成像膜
能在阳光下完美成像

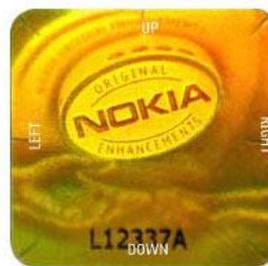


5.5.4 全息照相的应用

模压全息

1980年，美国科学家利用压印全息技术，将全息表面结构转移到聚酯薄膜上，从而成功地印制出世界上第一张模压全息图片。

从上面看全息标签：



从下面看全息标签：

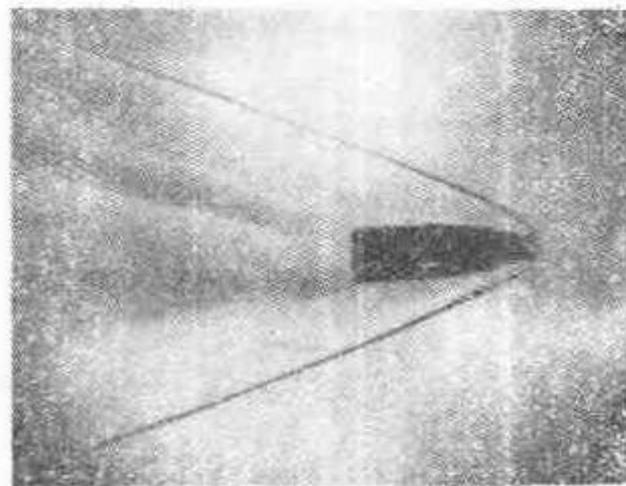
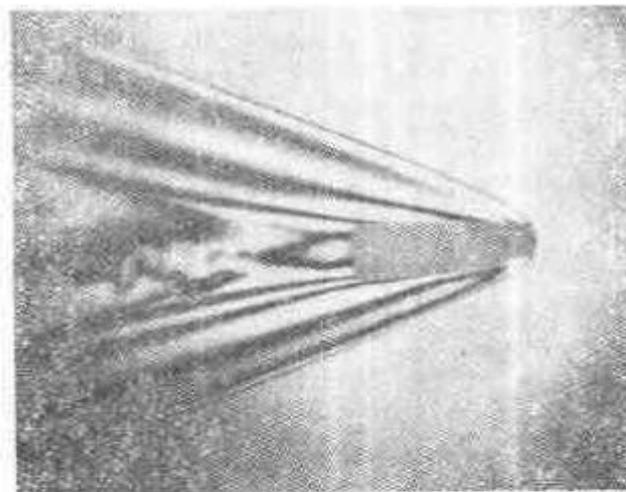


彩虹全息的模压复制是1979年RCA公司为解决视频标准件的全息拷贝而提出的，以后在美国、日本、英国得到迅速发展。1981年日本举办了首届模压全息图展览。模压全息图的制作可分为三个阶段：首先记录彩虹全息图；然后将全息图上条纹形状转移到金属模上，制成镍压模；最后将压模上的条纹形状印到透明塑料上。这种技术可大量复制，大约可印一百万次以上。现已形成全息印刷产业。我国在1985年有生产模压全息的厂家，到1994年已有250余家，居世界首位。

5.5.4 全息照相的应用

全息干涉技术

3500英尺/秒飞行子弹的两次曝光全息照片。脉冲红宝石激光器记录两次高速曝光，一次没有子弹，一次子弹出现。获取两次叠加的全息照片（上图）。可以看到冲击波的图像并紧跟子弹的紊流。与子弹一次曝光（下图）的全息图相比，信息量大大丰富。



5.5.4 全息照相的应用

全息照相提高显微镜分辨率的原理

1. 高分辨率显微镜要求大数值孔径，导致景深很浅，因此只能看到一个平面内的物，对于立体图需要多次调焦。全息图的三维记录功能解决了景深和分辨率的矛盾。
2. 显微镜的透镜组存在像差和衍射极限，使其分辨率只能达到波长量级。全息照相在记录和显示物体时，可以不使用透镜，从而避免像差，达到很小的衍射极限。
3. 拍摄和显示时，采用不同的激光器，可以实现图像的放大。例如采用X射线拍摄，可见光显示，可获得很大的放大率。

5.5 全息照相的应用

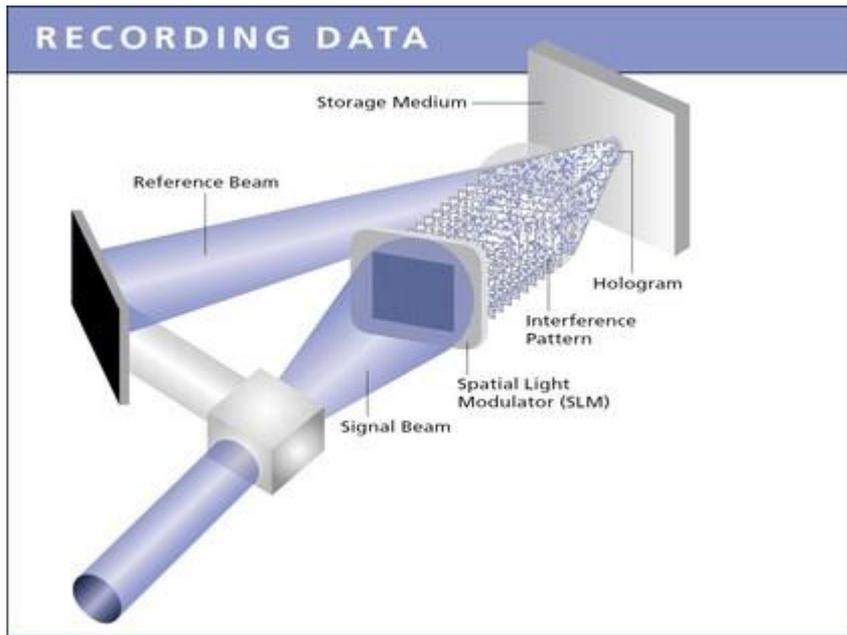
全息存储

记录介质：感光乳剂、铌酸锂(LiNb_3O_3)单晶

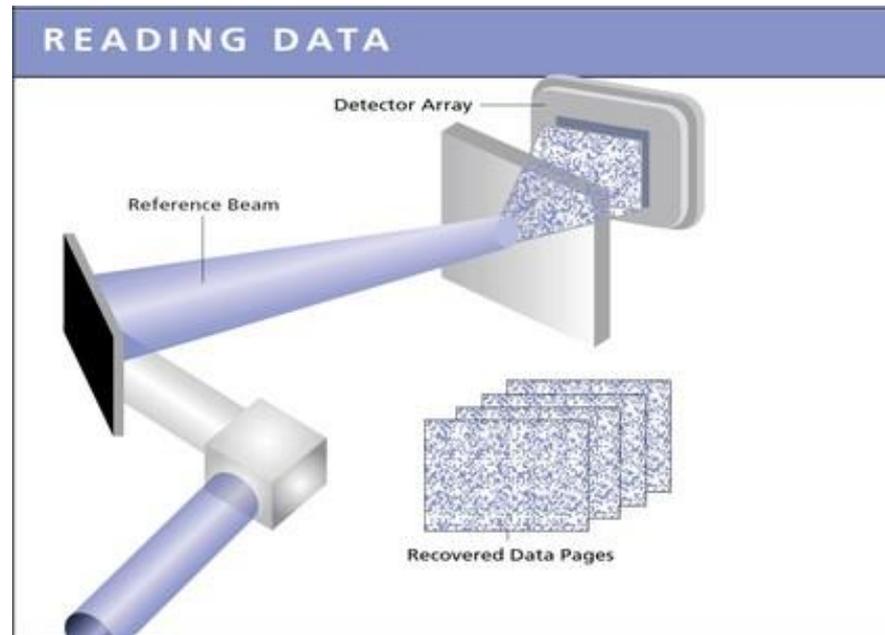
1. 感光乳剂是常规记录介质，用黑度来记录振幅。
2. 铌酸锂晶体通过折射率的改变量来记录光强（正比）
3. 铌酸锂晶体可以实现高密度记录。1cm晶体可记录超过1000副全息图像，分辨本领超过1600线/mm。
4. 可证明用全息图或傅里叶频谱的方式记录和恢复信号比用实相好，有猜测人脑对于信息的存储方式可能采用此类方法。

5.5.4 全息照相的应用

全息存储



写入



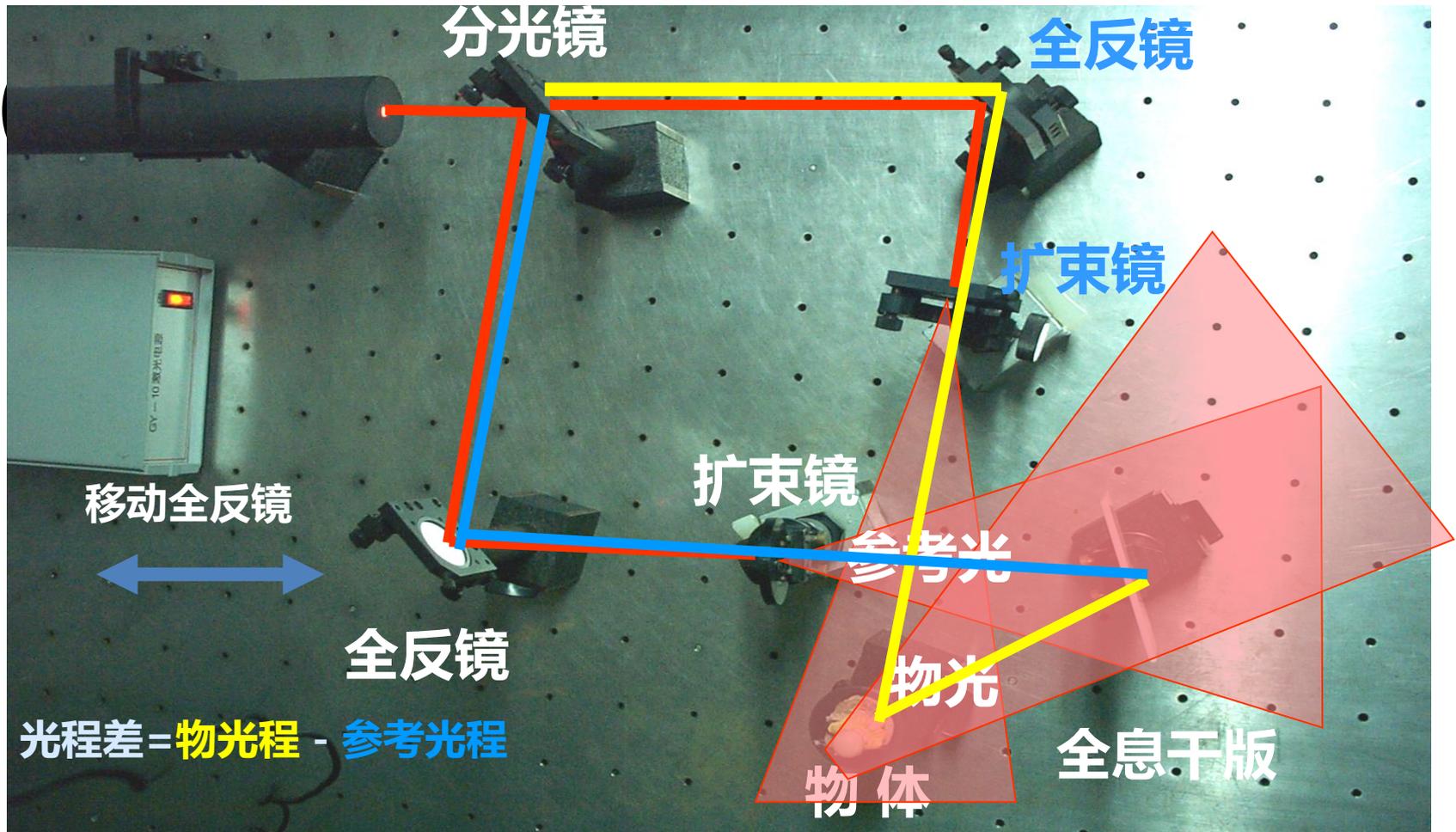
读取



InPhase's Tapestry system
商用全息存储设备（采用光盘作介质）

5.5.5 全息照相装置及实验注意事项

拍摄全息图的典型实验装置



5.5.5 全息照相装置及实验注意事项

拍摄注意事项

1. 选择具有较长相干长度的光源。
2. 装置尽量避免震动。
3. 调节参考光和物光的夹角，过大则要求记录材料的分辨率提高，过小再现时观察视角受限。
4. 光程调节：保证参考光与物光严格等光程。
5. 尽量减少光强损失。
6. 扩束 - 滤波系统调节：产生均匀的平面波或发散球面波。
7. 被摄物体的选择及照明。使物光波尽可能均匀散射到整个全息底片上。
8. 选择合适的光束比，使全息图有最高的反衬度。
9. 选择合适的光曝光量，实现线性记录。

本节重点

1. 全息照相的基本过程（理解）。
2. 全息照相的基本原理（理解）。
3. 全息照相的主要应用（了解）。

作业

P157-1,4

重排版 : P370-1,4