

三个参量。就象在类比电路中一样，微穿孔板结构有一共振频率，此时声质量和声顺二者的声抗相等，互相抵消，声波传播完全由声阻控制。而如果穿孔板的声阻与空气中的声阻（在每单位面积内等于空气密度乘以声速）“匹配”（二者相等），投射来的声能就完全为微穿孔板结构吸收，否则只部分地吸收而反射一部分。在共振频率的上下，吸收渐小，形成一个吸收峰。吸收峰的宽窄和声阻与声质量之比有关。在普通穿孔板结构中，声阻与声质量的比值很小（约与孔径平方成反比），只有另加多孔性吸声材料才能使这个比值提高，因而加宽吸收峰。穿孔小到一定程度（实践证明要小于1毫米），声阻与声质量比就大大提高，使微穿孔板吸声结构在很宽的频带中吸收。所以微穿孔板吸声结构的最大特点就是构造简单，它的最大吸收，频率范围都可以设计。它可以在特殊环境中使用。

如果声波向微穿孔板吸声结构入射的方向不只有一个，例如在一个房间里，各种方向都有，每个入射方向的共振吸收频率不同，各个方向的吸收峰就彼此错开，有互相平均的倾向。这时（称为漫入射）就没有很明显的共振峰，在一定频率以上都能吸收，不过吸收较低（平均的结果）。要改进它的特性，可以采用双层串联结构，如图3。用两层微穿孔板，距离不同，可以使总声阻增加，并且使吸收频带大大向低频扩展。它的原理也可以用类比电路来了解。图4为微穿孔板吸声结构的一些测量结果。四种微穿孔板基本都是用0.75毫米厚的铝板制成，各穿以直径0.75毫米的孔，每平方米穿3万个（有一种板稍厚，但孔数也较多）。两个虚线为在驻波管中测得的正入射，吸声系数为1时代表完全吸收。可以看出吸收峰的形状，当后腔距离由8厘米增至24厘米时，还可以看出第一吸收峰后还有第二、第三……吸收峰。两个实线代表混响室内大面积漫入射测量的结果，单层结构的平均作用和双层结构的改进都是非常明显的。在双层结构的测得值中，吸声系数大于1是由于边缘效应的结果，高吸声系数的测量中常有这个现象。

微穿孔板可以用任何薄板制造，我们用过铝板，胶木板，纸板，也可以用钢板，马口铁板，塑料板等，效果

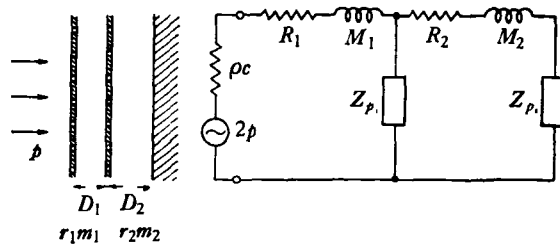


图3 双层串联微穿孔板结构及其类比电路

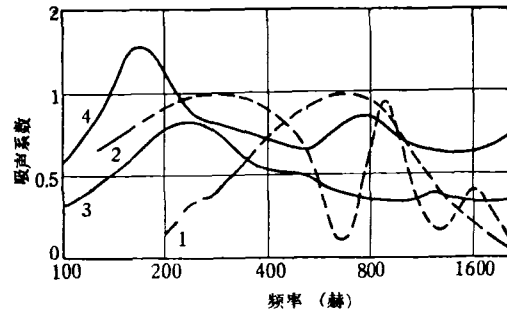


图4 微穿孔板吸声结构的吸声特性(测得值)

1.  $d = 0.75, t = 1, b/d = 4.7, D = 0.08;$
2.  $d = 0.75, t = 0.5, b/d = 7.7, D = 0.24;$
3.  $d = 0.75, t = 0.05, b/d = 7.7, D = 0.20;$
4.  $d = 0.75, t = 0.5, b/d = 7.7, D_1 = 0.08, D_2 = 0.16$

都很好。如果用金属板制造，对气流、温度等都有抵抗力，短时间的火焰喷射也没有影响。在放空消声器中使用，证明水蒸汽和凝水都不甚影响它的特性。作为普通使用的吸声结构，非金属材料也可以用，要求整洁、美观等就更没有困难了。微穿孔板的制造也容易，孔径和孔数要求都不严格，只是平均值起作用。孔可用冲压或压挤，不必整齐，压后在一面凸出也不影响吸声性质。事实上，最初实验用的大面积铝板样品是用缝鞋机加上钢针头穿孔的，纸板的孔是用针刺的，消声器用钢板上的孔是用铁钉和榔头打出来的，当然也有用钻床钻的或冲床冲的。这些由工人师傅和技术人员创造出来的好方法对微穿孔板的发展和使用时都起了很大作用，以后还会有更多的创造。

## 液面法声全息成象\*

检测超声组

(中国科学院物理研究所)

声全息成象是继光全息照相之后发展起来的一种全息技术(关于全息照相的原理,请参考本刊第三卷第一期王永昭《全息照相》一文)。声波具有能够在不透

光的物质中传播的特性,利用声全息成象便有可能得

\* 1974年4月24日收到。

到不透光物体内部结构的象，因而就有可能在医学诊断、无损探伤、水下显示及地层探测等方面得到应用。我们仅就声全息成像技术中的一种方法，即“液面法”做了一些实验方面的尝试，得到了一些简单物体的象。

## 一、几种声全息成像方法简介

声全息和光全息的基本原理是一样的，只是把形成全息图的光波换用声波。除物体波束外，在基本的方法中，也要加入参考波以形成全息图，然后再经过激光重现而得到可见的物体的象；重现时又用光波，这是因为声波是看不见的，而重现是要看的。但是，声全息有它的一些特性，影响较大的是：在声全息中目前还没有象光全息中那样对声敏感的声敏底片来记录声全息图，所以人们想了不少方法来获得声全息图。按获得声全息图的方法来分，声全息方法中有机械扫描法，电子束扫描法、阵列法、液面法等等。我们仅就上述几种声全息方法分别做一些简单介绍。要先说明一下，这些方法都是在水中进行的，这是因为所用声波频率较高，如果在空气中进行，超声在短距离内便衰减掉了。

### 1. 机械扫描法

图1是机械扫描法的示意图。物体置于水槽中，由一超声换能器发射出超声来照射它，超声接收器则来回地在水中物体后面的声场进行扫描，把声场各点的声信号转换为电讯号，然后适当加上激发发声换能器的电信号（这相当于加入了参考波），再经过检波放大，输入到示波器中控制阳极电压，使荧光屏亮度随之变化。当机械扫描和示波管中的电子束扫描同步时，示波器荧光屏上就显示出声全息图。

这里需要说明的是，接收换能器所接收的单单是物体波声场的声压，水箱中并没有参考声束。这是由

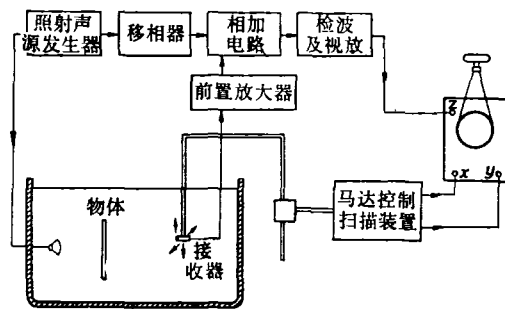


图1 机械扫描法示意图

于声电接收换能器可以把声压的幅度和相位都记录下来，所以方法中可以在电路里加入相应于参考声波的电讯号，以形成全息图，这和水中加入参考声波先形成声的全息图，再由声接收器通过扫描把声全息图变成电讯号记录在示波器上有一样的效果。电参考的使

用很方便，这一点在光全息中是不行的，因为直到现在还没有能够响应光的振幅和相位的接收器，而只有记录光强的乳胶。这是声全息的一个特点，即具有方便的线性检测器。声全息技术中的机械扫描法、电子束扫描法及阵列法等都可以利用这一特点。上述所加的电参考波是和声波电源同频率的正弦信号；如果把电参考信号相对于声源电振荡移动相位，就相当于促使参考声束和物体声束偏斜一个角度。

机械扫描法的优点是孔径能做得较大，分辨率较高，缺点是速度慢。

### 2. 电子扫描法

用较大的压电晶片来接收经超声照射所形成的物体声场，然后用电子束对这个较大的压电晶片进行扫描，变为电信号，在加入电参考信号之后，在阴极射线管屏上得到全息图。或由压电晶片直接接收声全息图，然后再用电子束对晶片扫描。电子扫描法速度较快，但压电晶片不能做得很大，否则容易破裂，因而孔径较小。

### 3. 阵列法

前面提到的机械扫描法需要接收换能器在声场内做机械运动，速度慢。阵列法是在声场内用性能相同的许多接收换能器（如许多小晶片），排成阵列，然后用门电路和逻辑电路把每个换能器的信号顺序传递出去，这样地用逐个传送代替了机械扫描。可以同样使用电参考，最后可在示波器荧光屏上得到全息图。

### 4. 液面法

液气界面在声波的作用下会随着投射声波的强弱而起伏。同频率的物体声束和参考声束在液面上迭加，就在液面上形成起伏稳定的干涉条纹，也就是声全息图。液面法的主要优点是能实时成象而设备比较简单。下一节将介绍我们在这方面的尝试。

## 二、液面法实验方案和实验结果

我们在液面法声全息成象方面主要做了两种方式的实验，一是双声束型成象实验，即使物体声束和参考声束干涉，在液面形成全息图；另一是声栅法成象实验，即用单声束（物体束）去调制声栅，得到声栅型全息图。

### 1. 双声束型成象实验

实验安排如图2所示，两个换能器接在同一个电发生器上，在水中产生两束声，一束照射物体，形成物体声束，另一束作为参考声束，两束声在液面上相干涉，产生近似地正比于总声强的形变，形成全息图。为了使声束的声场均匀，两个换能器前面分别加了声透

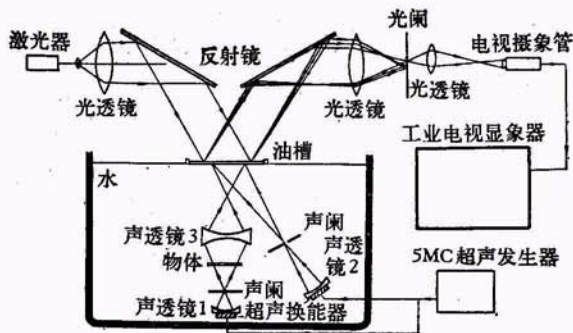


图2 液面法实时成像装置

镜1、2及声栏。声透镜3把物体的象成在液面上,以提高最后成象的质量。为了避免水面扰动的影响,用了一个小槽,槽底是张紧了的透声薄膜,小槽内装着表面张力和粘滞系数较合适的液体(如硅油)。

观察物体象,可以用实时成象的方法,也可用两步成象方法。所谓实时成象,就是在当时造成可见的物体象。方法是直接用激光来照射液面的全息图,这时,很微弱的液面起伏会使入射激光发生衍射,产生零级及正负一级三个不同方向的反射光,用光透镜会聚后形成三个亮斑,选出其中正一级或负一级光束就可以观察到物体的象了。这个过程在图2中已经绘出。这种简便的实时成象的能力,是液面法的主要优点,也是液面法受到重视的原因。在实际应用中,可以观察到活动的不透光物体的内部结构及其活动情况。

两级成象法是先设法把液面起伏图案拍摄下来,再用激光重现。它的优点是拍摄的全息图可以长期保存。这里顺便提一下,我们在实际工作中,曾采用了一项措施,即把固体微粒散布在装液体的小槽内,这一层微粒会随声场分布安排开来,明显地显示出全息图。这个分布可用一般照相方法拍摄下来,进而用激光重现。图3就是用这种方法得到的全息图及重现象。这里虽然用了声透镜聚焦的方法,但由于声场均匀性未加改善等原因,象的质量并不好。

我们感到,在液面法全息实验中,声场的均匀性是个重要问题。使声场均匀化的方法有许多;这里,我们在平面换能器上安置短焦距声透镜,使声束会聚,又在焦点处置一声栏(即带小孔的橡皮),小孔直径约5mm,这样在一定距离之外可得到足够范围的较均匀声场。图4就是用阴影法拍摄的声场侧视图。

我们对参考声束和物体声束的均匀性都做了上述改善之后,进行了双声束无透镜的实时成象实验,并获得了简单物体的实时象。实验装置如图5所示,其中两声束交角约 $30^\circ$ ,所用声频率为5MC。物体的象如图6所示,实际物体是长为25mm、宽为17mm的空心字。每一笔划宽约4mm。

上述实验中,声波是连续的。为了减少声场所引起的液体流动的影响,也可采用高频脉冲声源,这样,在脉冲间歇期内,液体的扰动可以停息下来,不致于积累,影响全息图。

## 2. 单声束声栅调制实时重现

声栅法的具体安排如图7。这里采用了声栅以代替参考声束。所谓声栅是用透声材料和不透声材料

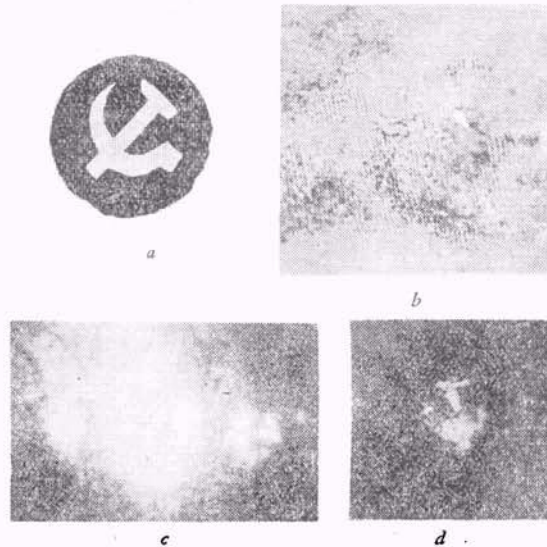


图3 双声束型聚焦象全息图及重现象  
a 实物; b 全息图; c 零级及正负一级衍射点, d 一级衍射点形成的物象。

交替构成的声的条形或网状的栅栏。

由于声栅的作用,在液面上,除了物体声束所引起的相应于物体象的液面形变外,还迭加上了声栅形状的液体形变。从频率调制的概念来看,物体声象是低空间频率的信号,周期性适宜的声栅声象则是高空间频率的信号。前者调制后者,有了声栅就不必用参考声束了。声栅法的分辨率和灵敏度都受到一些限制,但它也有些优点。用参考束的方法,一般要求参考声比物体声强几倍到几十倍,因为要求均匀,就由于实际困难,孔径不能做得太大;同时,利用两束声时,声源需是窄带稳频的。用声栅法不但可以增大声孔径,还可放宽声源频带。

图8d是用单声束声栅调制法得到的实时重现象。

## 三、讨 论

我们的工作还是很初步的,尚有待于扩大全息图孔径,提高分辨率等等。由于液面法声全息成象有实时重现的优点,所以很有希望应用在医学诊断和

非破坏检测方面。大家知道，X光可以显示人体的骨骼，但对软组织的反应是不够灵敏的，因为软组织的变化对X光能量的吸收影响不大。声波则不同，它不仅在骨骼表面有反射，在血管、肌肉等界面上也有反射，因此，用声波拍摄人体内部的照片就可以显示出软组织，例如血管、肌腱、肿瘤等。据报道，已经有人把液面法声全息成像设备应用在乳腺癌的研究上，它能视见乳房内部，或有可能发现早期癌病变。目前，液面法声全息成像技术在医学上正走向临床研究阶段。液面法声全息成像，特别是机械扫描法，应用在非破坏检测方面，也已得到一些内部缺陷的图象，在检测焊缝裂缝，蜂窝结构的脱粘，反应堆核燃料质量等方面

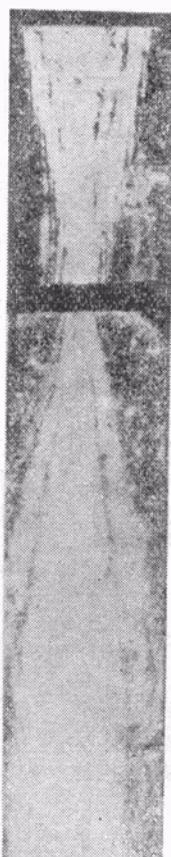


图4 用阴影法拍摄的声场侧视图

a 未处理的声场； b 由声透镜及声栏作用后的声场。

均有较有希望的尝试。

这里提一下关于重现声全息图中的纵向畸变问题。“畸变”的由来是因为声全息图必须用可见光来重现以得到可见象，而重现用的可见光光波波长比获得

声全息图的声波波长小几百倍(例如，使用5兆赫的超声形成液面全息图，其波长约0.3毫米；如果用氦氖激光重现，其波长为6328埃，比声波波长小500倍)。于是造成重现象纵向方向放大倍数比横向方向约大几百倍(其来由可参考本文附录)，以致物象失真，而受到眼睛或其他观察系统的景深的限制，只能看到平面象，没有立体感。因此，声全息成像比之于光全息照相是“失去”了三维成像的特点。但是这并不是真正就“失去”，在液面法声全息成像中用了“聚焦象”的方法，通过移动声透镜(如图2中的声透镜3)，使大物体的各剖面先后成像至液面上，得到物体各剖面的全息图，重现后得到物体各剖面的可见象。这样，还是可以看见物体各剖面的象，对整个物体有总的了解。这就在一定程度上弥补了纵向畸变的缺点。

频率高达千兆赫的超声，波长接近红外线，用这样高频的声波可以制成超声显微镜，以观察不透光物体的内部图象，其分辨率可接近于光学显微镜。由于高频声波衰减太大，目前还只适用于很薄的样品。如果今后发现超声显微镜能显示出无论是光学显微，或是电子显微镜都看不见的重要的生物学上细微结构的话，超声显微镜就更值得重视了。

在海洋里，声纳可以象雷达一样发现目标，但人们期望用声全息更直接地在水下成像。它的优点之一是不大受水里湍流和混浊的影响。目前这方面的研究工作正在进行，努力方向之一是加大作用距离。

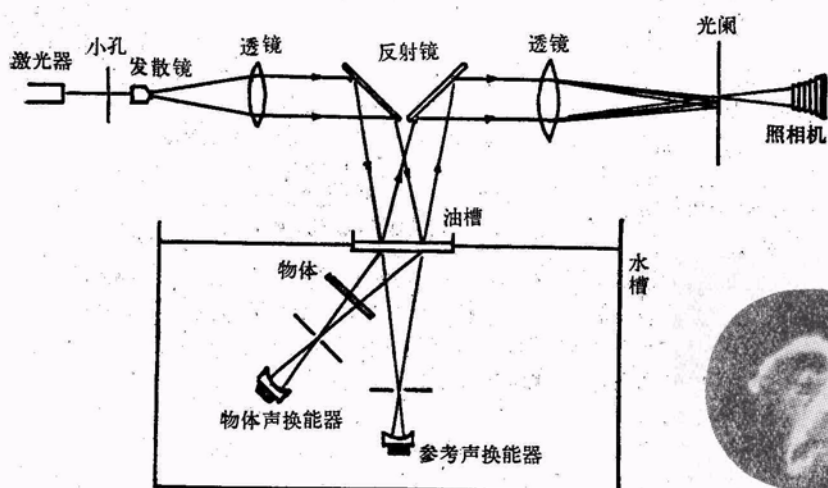


图5 双声速无透镜的实时成像实验装置图

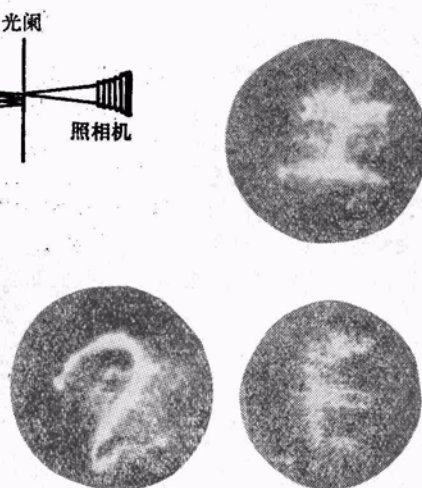


图6 工字，2字及字母“E”的重现象

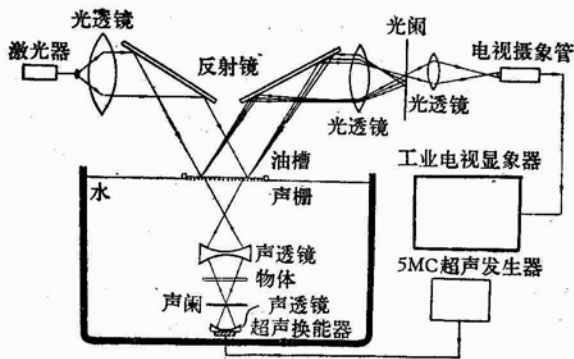


图7 声栅法成象实验装置

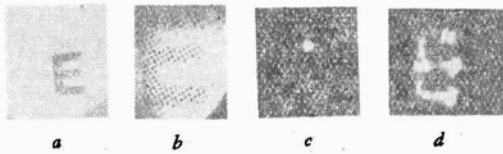


图8 声栅法得到的全息图及重现象

a 实物; b 全息图; c 零级和一级衍射点;  
d 一级点形成的物象。

很低频率的声波可以穿透地层; 用长波全息的方法来进行地层探测的工作还刚刚开始。由于地层比较均匀的水要复杂得多, 声的传播过程便也更复杂, 这是地下成象的一大困难。

总之, 声全息成象技术, 是从光全息照相引伸过来的。但是, 由于声波本身的特点, 又给了声全息成象技术以不同于光全息照相技术的不少途径。在研究方面已经取得了一些成象效果, 正在逐步走向应用。但是, 对于实际应用中的困难解决得还不够, 还有许多工作等待人们去做。随着工作的深入, 它的应用将会随之成熟和广泛起来。

### 附录 关于纵向畸变的定性解释

在声全息成象中, 被声照射的物体可以看成是无数点源的集合, 而任一个点源所发射的声波和平面参考波迭加而形成的全息图是一圈圈的圆环, 类似光学上的弗累涅尔带板 [见图 9(a)]. 点源的声全息图中亮环与暗环之间的距离是与声波波长有关的。在重现时, 一般却采用了光波; 显然, 让光波穿透这个声全息图来实现重现, 其效果与让声波做重现波有所不同。可以用光学中常用的光栅来类比, 我们知道, 如果用同一个光栅, 却改变入射光波的波长, 则入射波的波长越小, 它的衍射角也就越小。点声源的声全息图有一圈圈的圆环, 起着类似于“栅”的作用, 但这个“栅”本来是相应于声波的, 现在让波长小得多的光波来透射, 比起声波来说, 光波的衍射角要小得多, 这样光波会聚的交点会远离声全息图 [见图 9(b) 和 (c)]. 在这同时, 在横截面方向上, 光波比之声波并无差别, 故横向距离没有

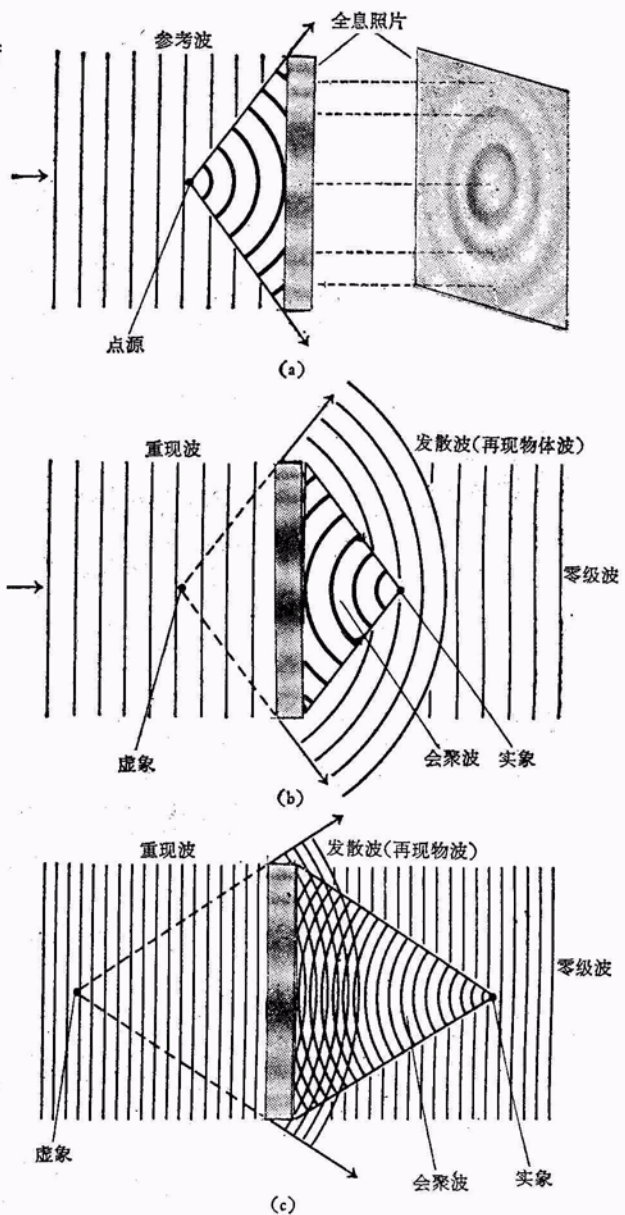


图9 点源的全息图及重现象

(a) 形成全息图; (b) 重现过程, 重现波长和原参考波长相同; (c) 重现过程, 重现波长小于原参考波长; 物象远离全息图, 造成纵向伸长。

变化。于是, 物体象只在纵向被拉长了。纵向畸变的结果是, 不但象的立体感没有了, 而且由于物体远离全息图, 要找到物象有时需要借助望远镜。为了减小纵向畸变, 可以采用横向压缩全息图的方法, 亦即加大栅的密度来弥补重现波长太短的缺点。不过缩小倍数也是有限的, 因为物象会跟着缩小, 太小了又需要高倍光放大才看得清, 而这时由于受高倍显微镜景深的限制, 仍然只能看见平面象, 所以, 这种矫正并不理想。