

科技专题参考资料

激光

(全息照相专集)

第五集

科学技术文献出版社重庆分社

激 光

第五集

中国科学技术情报研究所重庆分所 编 辑
科学技术文献出版社重庆分社 出 版

重庆市市中区胜利路91号

新华书店重庆发行所 发 行
宝鸡市人民印刷厂 印 刷

开本: 787×1092毫米¹/₁₆ 印张: 10 字数: 32万

1974年8月第一版 1974年8月第一次印刷

印数: 5,500

书号: 151760.4 定价: 1.00元

目 录

前言.....	
全息照相, 1948—1971.....	(1)
全息照相术的原理和应用导论.....	(16)
微波领域中的准全息技术.....	(34)
声全息术.....	(50)
数字全息照相.....	(66)
二波束干涉法微波全息照相.....	(79)
有畸变的微波全息照片的分析.....	(85)
微波全息照片及其光学的像再生.....	(93)
微波全息术.....	(100)
相减微波全息术及其在等离子体研究中的应用.....	(107)
由微波全息图的缩小尺寸的复制图再现可见像.....	(110)
综合孔径法在源扫描型微波全息照相中的应用.....	(113)
使用反射板的微波二波束干涉法全息照相.....	(114)
用声波制作全息图的设备和方法.....	(115)
射频全息图.....	(119)
彩色全息照相术.....	(123)
在全息图再现像的过程中减少斑点的方法和装置.....	(125)
使用空间滤波器的辨识系统.....	(128)
液晶和光电导体的光电图像变换器.....	(132)
高质量和高信息存储密度的全息照片存储器.....	(134)
协合全息照相存储器设计的几何形状.....	(141)
拍频全息图.....	(147)
离轴型电子微型全息照相术.....	(150)
波源扫描型全息照相.....	(155)

全息照相, 1948—1971

在作这个演讲时, 我比许多前辈有更多的方便之处, 因为我不必写一个方程式或绘出一个抽象的图解。自然, 人们能引入几乎任意多数学式到全息照相中, 但其本质的东西是可以从物理意义上来说明和理解的。

全息照相是以光的波动性为基础的, 这个特性在1801年第一次由杨氏用一个十分简单的实验令人信服地加以证明(参看图1)。他让一束阳光进入一个暗室, 在暗室的前面, 放置一个黑屏, 其上戳有二个小孔, 在其后某一距离, 置一白色屏。于是, 他看到在一条亮线两侧各有一条暗线。这个现象给他很大鼓舞去重复这个实验。这次用一个酒精灯作为光源, 並加入一点盐, 以便产生明亮的黄色钠光。这一次他就观察到了许多规则相间的暗线, 这就第一次清楚地证明了光加光能产生黑暗。这个现象称为干涉。杨氏早就预料到这个现象, 因为他深信光的波动理论。他对于惠更斯的原始观念所作的贡献是直觉地认识到单色光在当时称为“以太”的媒质中表现为规则的正弦振动。如果确是如此, 那末, 波峰叠加波峰成为更明亮, 波峰叠加波谷成为黑暗就必定是可能的。

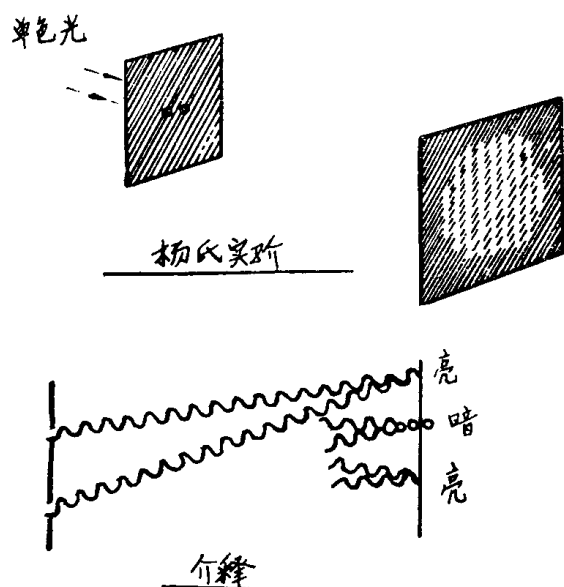


图1. 杨氏干涉实验。1801.

能够产生干涉的光称为“相干光”, 並且, 很明显, 为了产生很多干涉条纹, 光必须是非常单色的。相干性可以很方便地用同一光源的二束光间的程差来量度, 两束光之间的程差可能有所不同, 但尚能给出可观察到的干涉反差的那个(最大的)程差。这个量称为相干长度, 在全息照相理论和实践中是一个重要的量。瑞利和迈克耳孙是最先了解相干长度为谱线宽度的倒数的人。迈克耳孙用它作为光谱分析的巧妙方法和用作星球直径的测量。

现在, 让我们跳过一个半世纪, 到1947年, 那时, 我对电子显微镜很感兴趣。这个神奇的仪器在当时已经在分辨率上比最好的光学显微镜高出100倍, 但仍然有令人失望之处, 因为它还不能分辨原子点阵。快电子的德布罗意波长, 大约 $1/20$ 埃, 这是足够短的, 但(电子)光学系统是不完善的。人们所能作出的最好的电子物镜, 在光学完善性上只能比作一个水滴而不能与显微镜的物镜相比较, 並且, 通过Scherzer的理论工作表明, 它已经不能再改进了。它的理论极限当时估计为4埃, 恰恰为分辨原子点阵所需要的二倍, 而实际限度大约为12埃。这些极限是由于必须限制电子透镜的孔径在千分之几个弧度内而造成的, 在这样的角度内, 球面像差的误差大约等于衍射误差。如果使这个孔径加倍, 则衍射误差减半, 球面像差的误差增至八倍, 这样, 物像无可挽回地给弄模糊了。

这个问题经过一个长时间思考之后, 1947年的某天, 一种解决办法突然在我思想上呈现了, 其情况有点像图2所表明的那样。为什么不取一个坏的电子像, 但却包含着整个信息而用光学方法来校正它呢? 经过一段时间, 我清楚地认识到要做到这点, 如果可能的话, 只有用相干的电子束, 用具有确定位相的电子波。但一张普通照片只记录强度而完全失去位相信息。这並不奇怪, 如果我们没有什么东西和它作比较, 这种信息怎能不失去呢? 让我们看看: 如果我们叠加一个标准的, 一个相干背景到它之上会有什么现象发生呢! 对仅有一个物点的简单情况, 我的论点示于图2。物波与相干背景或参考波的干涉将产生干

涉条纹。二个波相位一致的地方将出现最大值。让我们制作一个有强反差的正片，使它仅在最大值处透光，并且，只用参考光源照明。现在，对参考光源A来说，位相自然是正确的，但由于在各缝隙上相位是一致的，因此，对B来说，位相也是正确的；这样一来，B波也必然出现，即“被再现了”。

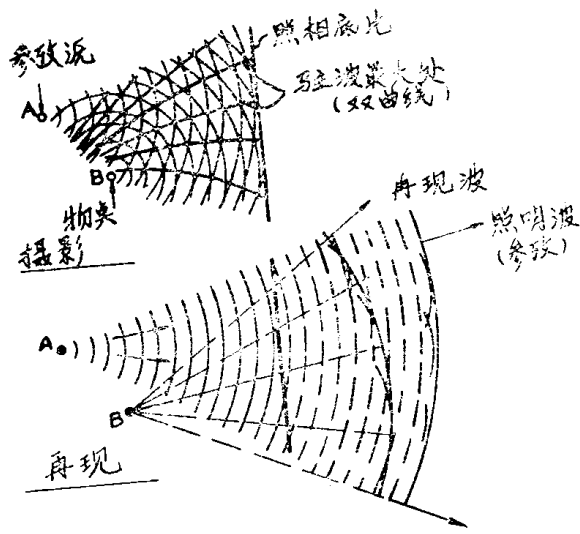


图2. 全息术的基本思想，1947.

用少许一点数学即能证明，这个原理，对于一个以上的物点，对于任何复杂的物体也是正确的。稍后，就会知道，在全息照像方面，大自然是站在发明

者这一边的；不再需要作一个强反差的正片，几乎任何底片都可以用了。这鼓舞了我用再现波前（当时这样称呼）的方法去完成我的电子显微镜计划，并建议采用图3那样的二步法。电子显微镜是用以产生物体射束和相干背景的干涉花样，而相干背景即照明射束的非衍射部分。这个干涉图，我称它为“全息图”，是从一个希腊字“holos”得来——即完整的意思，因为它包含了完整的信息。然后，这个全息图在校正了电子光学象差的一个光学系统中用光来再现。

我是立足于二位物理学家W. L. Bragg 和 Fritz Zernike 的基础上进行这项工作的。早在几年前，Bragg就向我介绍了他的“X-射线显微镜”，一个光的富里叶变换装置。人们放一个倒置点阵的小照片到这个装置中，获得了电子密度的投影。但这只在一定特殊情况下，即当相位全是实数，并有同一符号才行。在那时，我和Bragg都不知道 Mieczyslaw Wolfke 已在1921年建议了这个方法，但没有在实验上实现它。所以，二步法的思想是由 Bragg 启发起的。另一面，Fritz Zernike 在他关于透镜球面像差的研究中成功地应用了相干背景，显示出了它们的位相，而不仅仅是显示出它们的强度。只是再现的原理，没有被他们察觉。

1947年，我在英格兰 Rugby 城 British Thomson—Houston 公司的研究室工作。从电子显微镜入手使我产生了全息照相的思想。我获

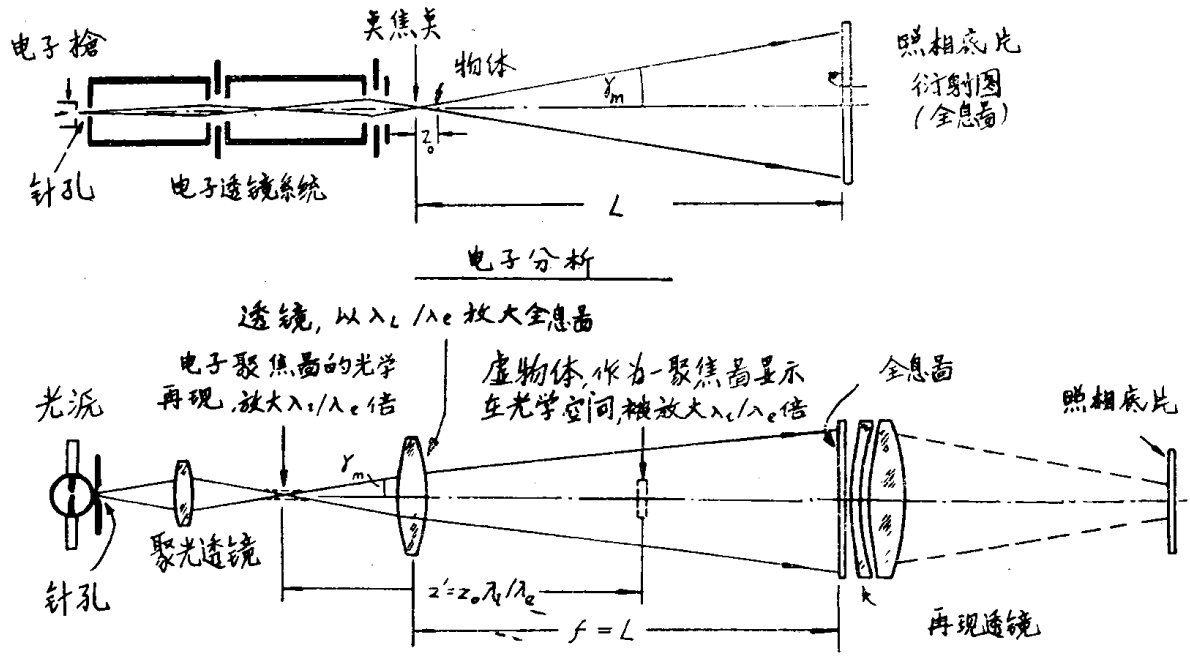


图3. 用再现波前的电子显微镜原理 (Gabor, Proc. Roy. Soc. vol A197 P454 1949)

得允许去作某些光学实验。图4是我们最初的全息再现图之一。实验是不容易的，在相干性和光强之间最

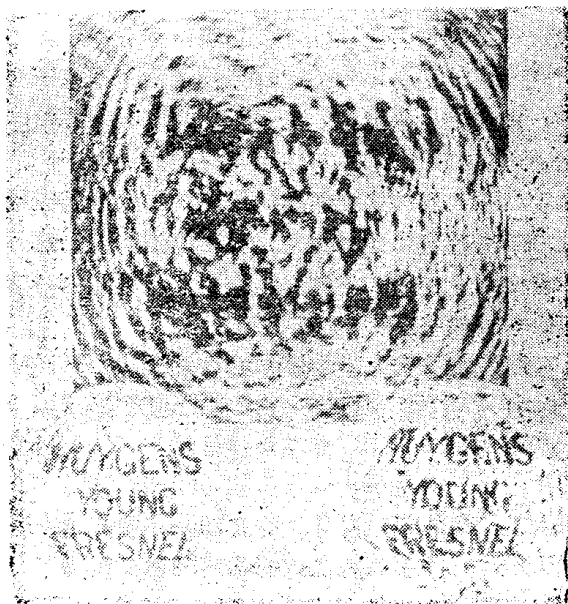


图4. 最初的全息再现1948

好的折衷方案是使用一个高压水银灯，它的相干长度仅有0.1毫米，够供大约200条干涉条纹。但为了获得空间相干性，我们（我的助手Ivor Williams和我）不得不用一条水银线去照明一个3微米直径的针孔。这使得我们的光强只够去作一个物体的大约1厘米直径的全息图（该物体是大约1毫米直径的显微照片），这是用当时所能获得的最灵敏的感光乳胶，经过几分钟曝光得到的。小的相干长度迫使我们把每一件东西都安排在同一轴上。这个现在称之为“同轴全息照相”，它是当时唯一可行的。图5示出了我们一系列实验中经过某些改进的最好的一个。但它远不是完善的。除开引起无规干扰的“斑点”以外，从图上字母的畸变也可以看出还存在着一种系统的缺陷。图6给出了这个情况的解释。干扰是由于不只一个像，而是二个像所引起的。物体的每一点都发出一个球面次波，它与背景干涉产生一个圆形费涅尔半波带系统。这样一个系统叫Soret透镜。这是一个同时既为正又为负的透镜。它的一个焦点是在物点的原始位置，另一个在该点的共轭点（相对于照明波前）。如果人们使用“同轴全息照相”，则两个像在同一线上，因此只能用聚焦的办法来分开它们。但这种分开是决不会完全的，因为在用常规的相干照明时，每一点在其后都会遗留下一个“痕迹”，这个痕迹将延伸到很长的距离。

稍后，我将说明，利用激光的优良的相干性，现代激光全息照相多么容易地就摆脱了这种干扰，但激



图5. [早期全息照片的另一例子

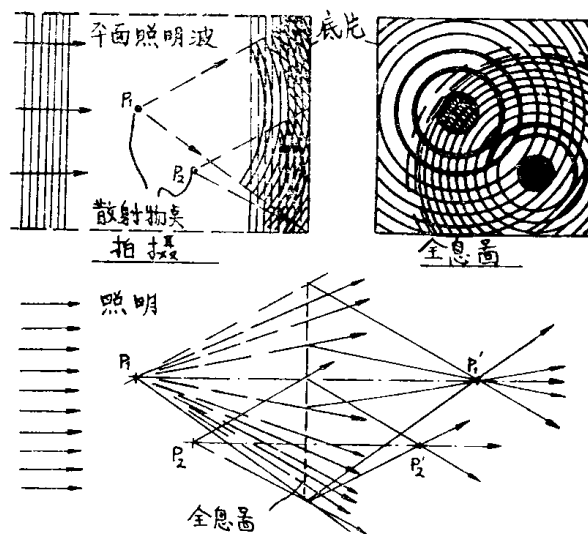


图6. 第二个像。以Soret透镜来作为单个物点全息图的说明。

光在1948年我进行工作时是没有的。不过我仍有信心认为在应用中能消除这第二个像。当时，唯一使我感兴趣的应用是用电子显微镜看原子。示于图7的这个方法就是正好利用电子透镜的缺陷，即球面像差来消除第二个像。如果有球面像差的（电子）透镜作出一个电子全息图，然后就可利用适当的光学方法去校正二个像中的一个，其另一个这时就有二倍像差因而几乎完全被抹去。图7示出了一个完全清楚的再现，其中已没有由第二个像所引起的干扰残留。这样好的一个再现竟能用如此坏的透镜得到，这透镜的分辨率比

我们要想获得的至少要坏10倍。这个极坏的透镜是由颠倒显微镜的物镜的方法得到的，在再现时也同样使用。

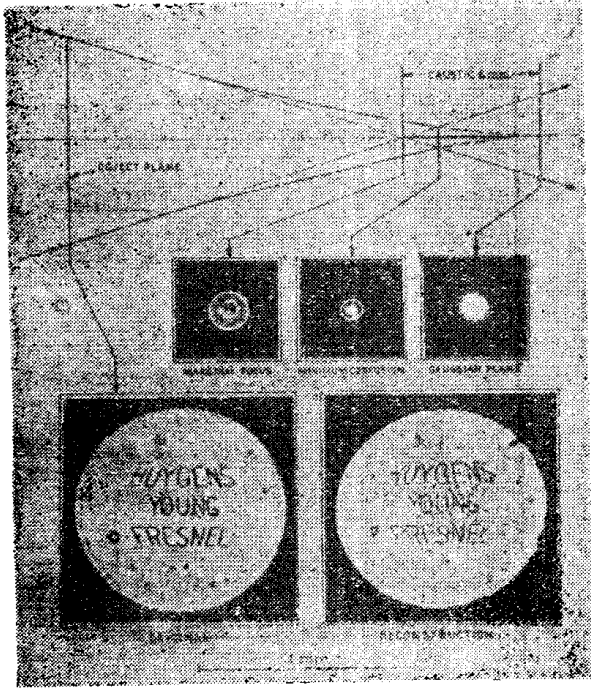


图7. 在再现时用补偿球面像差的方法消除第二个像。

于是，就有了一些信心，在两年以后，即1950年，在 Allibone 博士的指导下，我同我的朋友和同事Haine, Dyson和Mulvey一起，在Alelarmaston城Associated Electrical Industries实验室开始全息电子显微镜的研制计划。到那个时候，我已进入皇家学院工作。在三年的过程中，我们相当成功地改善了电子显微镜，但最后，我们仍不得不放弃这项工作，因为我们开始得太早了。结果，电子显微镜仍然远远达不到光学像差所限定的极限。它受到了振动、杂散磁场、工作台的蠕变、物件的污染等等之影响，所有这些再加上由于在微弱的相干电子束工作时需要有长时间的曝光而变得更坏。现在，经过20年后，由于这时期在电子显微镜方面的精心研究，已克服了上述各种缺陷，今天应该是执行这个计划的正确时间了。目前，电子显微镜的分辨率达到球面像差所限定的极限，大约3.5埃，为了分辨原子点阵，仅需要再改进一倍即可。并且，由于场致发射阴极研制的发展，相干电流的量值已增加了3—4个数量级，所以现在已如我们在1951年所期待的那样，不再需要那样长的曝光时间。这样，或许我还能活着看到我们宿愿的实现。

我的第一篇关于波前再现的论文立即引起了一些反应。在英国，G. L. Rogers对这个技术作了重要

的贡献，他作出了第一个相位全息图；并且还阐明了理论。在加利福尼亚，Alberto Baez, Hussein El-Sum和P. Kirkpatrick 在X射线全息术方面也取得了有趣的收获。就我自己这部分来讲，是与我的同事W. P. Goss一起，制作了一个全息干涉显微镜，在这个显微镜中，以一个比较复杂的方法，用彼此“正交”的方式叠加二个全息图而消去了第二个像。光学工业对这个问题的反应是如此令人失望，以致11年以后直到1966年前，我不能列出关于这方面的一篇文章。在1955年左右，全息照相进入了一个长时期的冬眠状态。

随着密执安大学的Emmette N. Leith与Juris Upatnieks 发表了第一篇成功的激光全息照片后，全息照相在1963年突然爆炸性地再生了。他们的成功不仅是由于激光的出现，而且也由于Emmette N. Leith长期的理论准备。他在1955年就开始了这方面的工作。这件事我和其他人都不知道，因为Leith和他的同事Cutrona, Palermo, Porcello, 与Vivian 首先应用他的思想到当时被分类为“侧视雷达”的问题上〔6〕。事实上，这是一个二维电磁波全息像，一种电子全息照相的模拟。在雷达中所用的电磁波较光波大约长100,000倍，而电子波又较光波短100,000倍。他们的成就是辉煌的，但由于没有时间，很抱歉，我不能讨论它们。

1962年，当有激光可用时，Leith和Upatnieks能够用一种新的、简单而又有效的方法消除第二个像，获得远比我早先的更优越的结果〔7〕。这就是在图8中绘出的“斜射参考波”法。其所以成功可能

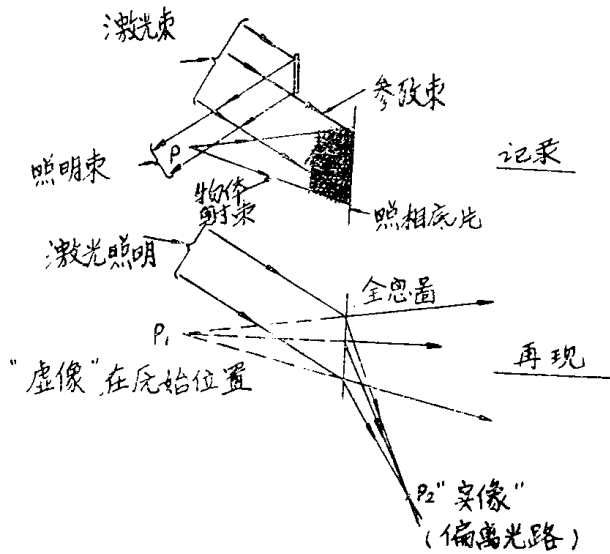


图8. 用斜射参考束的全息术

是由于氦-氖激光有很大的相干长度，它在1962年就已经超过水银灯的相干长度约3000倍。这就使得有可

能把参考束与照明束分开来了。现在，参考束不再要通过物体，而是能从物体旁边绕过去。这样产生的结果是二个再现的像现在不仅在深度上被分隔开了，而且在角度上它们也被分开达到参考束入射角的2倍。还有，相干激光的强度超过水银灯强度好几百万倍。这就使得应用很精细而低速的照相乳胶和用合理的曝光时间制作大的全息照片成为可能。

图9中示出了由Leith和Upatnieks在1963年所作的二个最早的再现现象。它们已经大大地超过了我在1948年所能作到的一切。特别有趣的是这两个像是由不同位置的参考束在同一张全息图上再现出来的。这就是全息图具有优越存储能力的第一次证明。Zeith和Upatnieks不久就能存储12张不同的图形在同一乳胶中。现在，人们已能用普通照相法在一张面积上存储100张甚至300页印刷件。

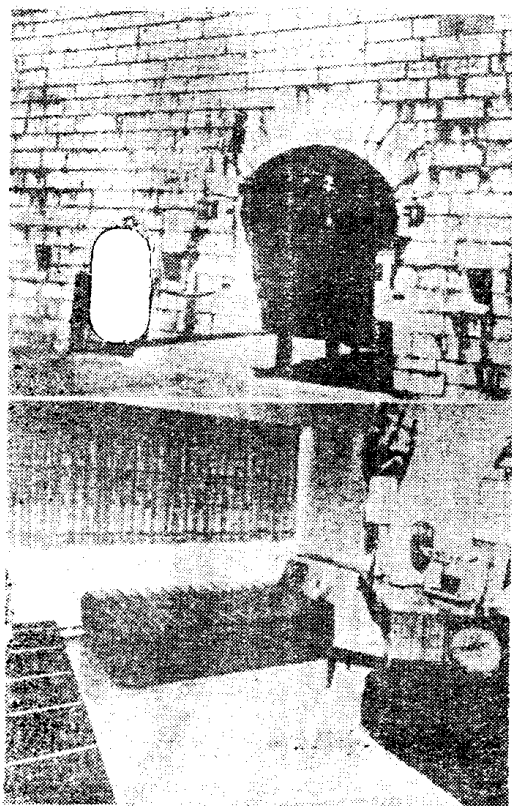


图9. 储存在一张全息图中的多幅像的最早的实例。

从那时起，全息照相的发展就非常迅速了。第一年里最辉煌的成就是三维物体的全息像，它们能用两眼同时观看。自然，全息照相从一开始就是三维的，但是，在我早先的小的全息照片上，人们仅能用聚焦的办法，透过显微镜或短焦距目镜的视场才能观看到。要做到这一点，单单使全息图放大是不够的，同时，还必须使照相底片上的每一点能对应物体的每一点。在早先用常规的照明方法拍取的全息图中，信息只包

含在一个衍射花样的小面积之内。

在粗糙的散射物体的情形下，不必特别仔细。物体表面的小窝窝和小突起会把光散射到一个很大的锥体之内。图10示出了粗糙物体如何安排的例子。它的再现示于图11（略）。借助漂白的全息图（“相位全息图”）人们有如通过一个明洁的窗口看座雕像本身一样的印象〔8〕。

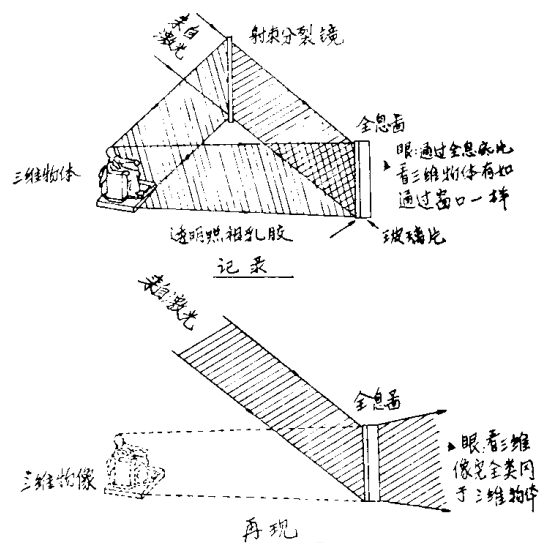


图10. 用激光照明的散射物体的三维全息图。

如果物体是非散射的，例如，它是一张透明画片，那末，通过一个散射器（诸如一块乳白玻璃）去照明这个物体，信息就散布在整个全息图面积上。这样一张“散射”全息图的外貌是十分特别的。它看起来像噪声一样（图12）。人们可以称它为“理想的

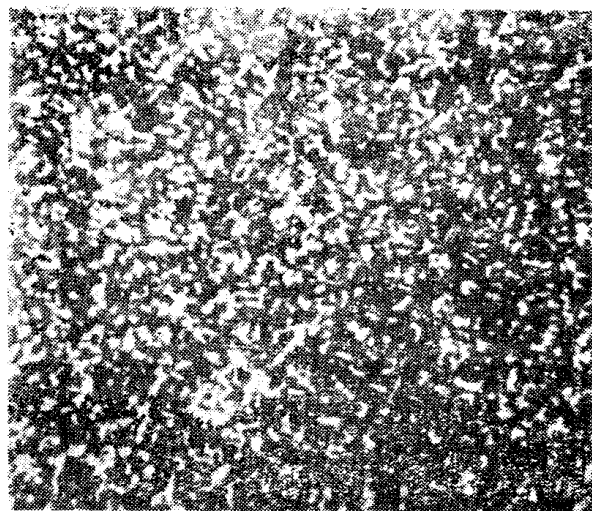


图12. 用散射照明作的全息图的高倍放大像。信息被遮盖在“噪声状”码中。

Shannon码”，因为 Claude E. Shannon 在他的通讯理论中已经证明，最有效的编码是在讯号中似乎

所有的规律性都已经散失；它必须是“噪声状”的。

在这样混乱的分布中，那里找讯息呢？可以看出，它并不是如它所表现的那样无规律性。它并不是如像沙粒被零乱地撒到整个照相底片上那样；它是一个颇为复杂的图形，物体的衍射花样，它在不规则的间隔重复，但大小和取向总是一样的。

这样的散射全息图的一个非常重要和有趣的特性是它的任一小部分（尚能包含衍射花样）都包含了整个物体的讯息，并且，用这种碎片仍能再现物体的像（虽然噪声大一些）。因此，一个散射全息图是一个“分散记忆器”，这一点已经引起了许多推测，是否人类的记忆也是这样全息式的，因为，众所周知，头脑可以被损坏相当大一部份但并没有抹去记忆的痕迹。这里没有时间去讨论这个十分令人鼓舞的问题。我仅仅想说，按我的意见，它们与人类记忆类似性仅仅是功能上的，当然不是结构上的。

可以看到，在全息照像的发展中，全息图总是变得越来越不像被拍摄的物体，但再现总是更趋完美。图13示出了由Leith和Upatnieks所作的，像前图一样的一张散射全息图照片的一个优良的再现。



图13. 平面透明画片的再现，
它是由散射照明所作成的全息图产生。

Ann Arbor在密执安大学完成的这个开创工作，还导向了全息技术的稳定化。今天，没有成千也有成百的实验室具有图14示出的那样一些全息技术装置；有很稳定的花岗岩基座或钢桌，以及各种处置相干光的光学器件。这些器件现在都由光学工业制造。在用稳态激光所作的各种工作中，高稳定性是绝对必要的，因为，在曝光期间，一个四分之一波长的移动就可能完全破坏一张全息图。

但是，自从1965年以来，已发展了全息照像的一个重要分支，它就不再需要高稳定性了，因为，用脉冲激光拍摄全息图只需要一微秒的几分之一。

试想，你给一位物理学家提出一个问题：“测定从喷气口以2马赫速度冲出的小滴的尺寸，它们的尺

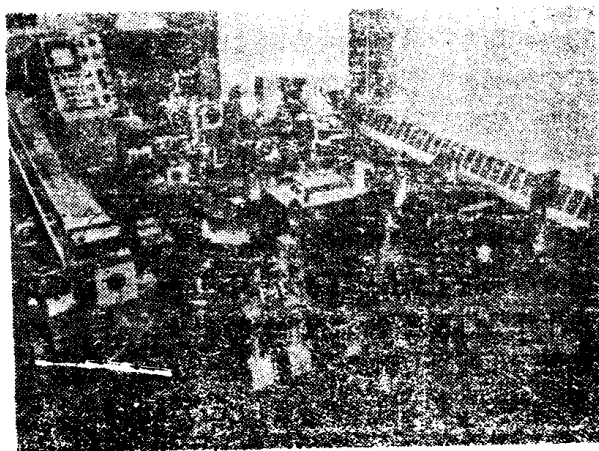
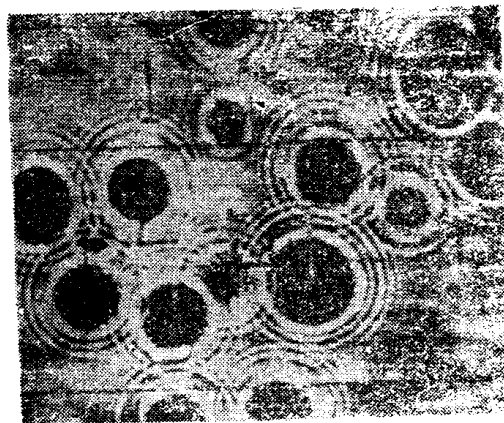
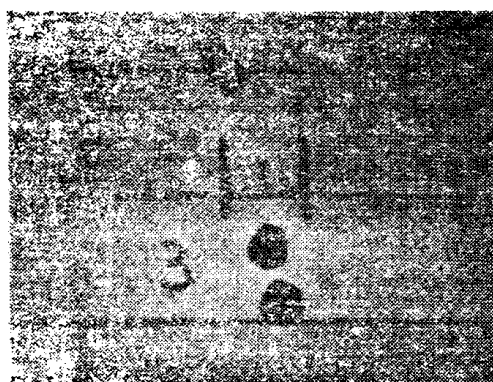


图14. 一个现代全息实验室的设备。

寸大约几微米多点。”肯定的，他只会失望地撒开两手！但是，现在要做的全部工作，是用一个20—30毫微秒的红宝石脉冲激光器，在某一安全距离上用照相底片去记录射流的一个简单同轴全息图。然后，人们就可以看到“实”像（或倒转照明光束作出虚像的一个实像），用显微镜来埋头研究这种射流的三维像，一个一个地对粒子聚焦观测。由于距离很长，第二个像的干扰完全可以忽略。图15示出了一个极好的实例。



在喷雾中带有悬浮粒的空气粒子的全息图。



聚焦了的带有悬浮粒的空气粒子。

图15. 观测射流的全息术。

正如TRW实验室的研究工作者所证明的那样，在一张全息图上记录几呎深脏水中的孑孓或空气中一米远的昆虫是可能的。图16示出了由一张全息图所作出的昆虫的二张再现像，它们是逐个地聚焦的。二位作者C.knox和R.E.Brooks也作了全息胶卷的电影记录，其中，用每一幅重新聚焦的办法，一个蚊子的飞行被跟踪到一个相当远的距离〔9〕。

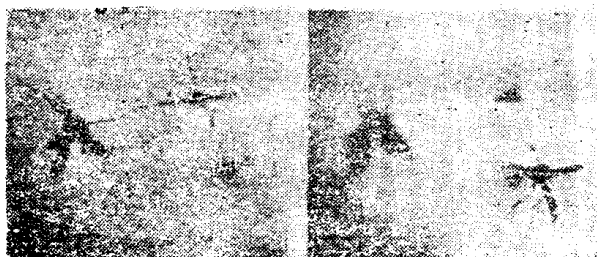


图16. 观察飞行中的蚊子。两图是由同一张全息图中现出。

TRW实验室的另一成就 (Ralph Wuerker 和他的同事们) 是引导我们到全息照像的另一分支，即全息干涉计量术。图17示出了一个子弹和它的一系列冲击波在碰到另一冲击波时的再现。但此图并不只是一个像，而是一个干涉计量像。图中的条纹表示这些点的轨迹，在这些点上，相对于射击前静止空气的情况而言，光迟后了整数个波长。这个比较标准是由前一次曝光得到的。因此，这是一个二次曝光的全息图，这个问题，后面将更详细地讨论〔10〕。

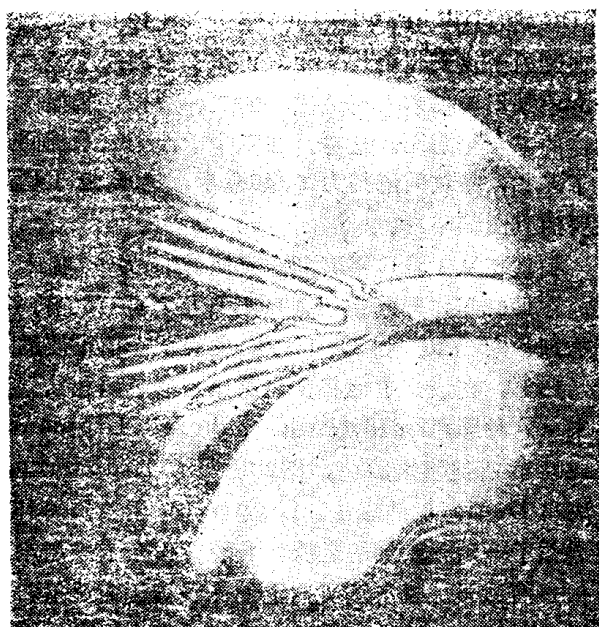


图17. 动态全息干涉计量术。这个全息干涉图的再现示出了二列空气冲击波前的相互作用与它们的联合流动。

图18(略)示出了脉冲全息照像的另一杰出成就：

由L.Siebert在Conductron公司所作出的一个全息三维人像。它是激光发展过程中的突出成果。红宝石激光 (首先由T.H.Maiman实现的) 是能够产生短脉冲的，但它的相干长度仅有几个厘米的数量级。这对于同轴全息照像没有妨碍，由于在这个情形下参考波几乎总是与衍射子波同步，但为了拍摄一个景物，例如说，一个一米深具有反射的物体，人们就必须用至少一米的相干长度。今天，30毫微秒脉冲宽度，在射束中有10焦耳能量和5—8米相干长度的单模脉冲已是可用的了；并且，最近已用来摄取了我的全息人像，见于本演讲所付之展品。

在1965年，R.L.Powell和K.A.Stetson二人在密执安大学作出了一个重要的发现。摄取一个运动物体的全息像是模糊不清的。但如果采用二次曝光体，第一次使物体处于静止，第二次使物体振动，这样，干涉条纹就会出现，示出的线是位移等于半波长整数倍的那些曲线。图19示出了由Powell和Stetson二人在1965年所记录下来的扬声器膜的振动模式〔11〕。图20是K.A.Stetson在Erik Ingelstam教授实验室所作的吉他的振动模式〔12〕。

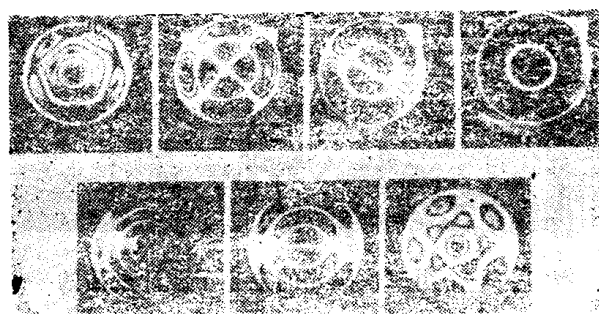


图19. 用全息干涉量度法获得的扬声器膜片的振动模式。

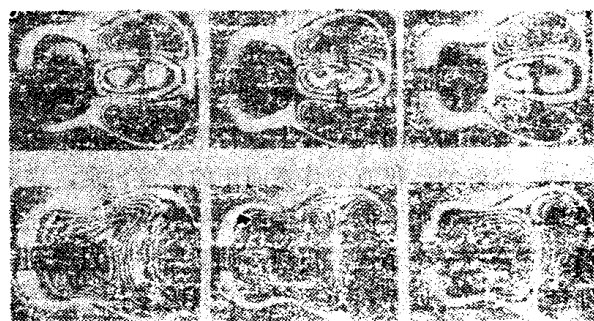


图20. 用全息干涉量度法记录下来的吉他振动模式。

说来也怪，TRW实验室的干涉图和Powell与Stetson的振动记录两者竟然出现在干涉计量原理简

单应用之前，而后者从历史发展来说应该先出现——如果科学的发展过程总是走最短路线的话。这里所说的是用二次曝光全息图观测固态物体的小形变。一个简单的解释如下：我们摄一个在状态A的物体的全息图。这个意味着我们用参考束将A波凝冻住。现在，让我们使物体形变，这样，它就处于状态B，并且，在同一照相乳胶上用同一参考束摄第二个全息图。我们将全息图显影并且用参考束照射。现在，在不同时刻凝冻的，彼此永不相见的A波和B波将要同时复活，并且彼此干涉。结果牛顿干涉花纹出现在物体上，每一条纹相应于半波长的形变。图21示出了由K. Haines和B. P. Heldebrand二人在1965年所作的这样一个全息干涉图的良好例子。本原理同时也由英国的J. M. Burch单独发现。

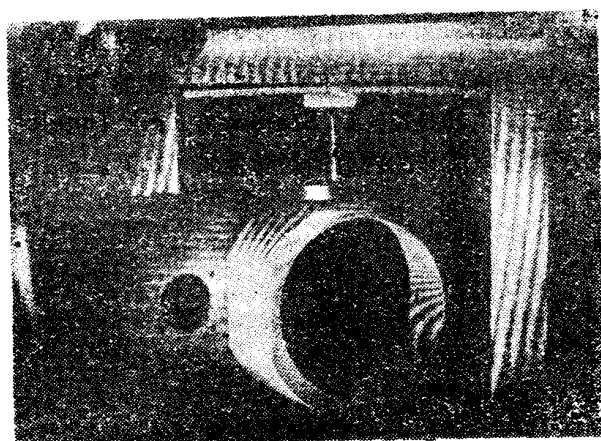


图21. 一个用二次曝光的全息干涉计量法的早期实例。

用全息干涉计量术作非破坏性检验是最近全息照像最重要的工业应用。图22示出了一个汽车轮胎的检验。轮胎的正面是直接拍摄的全息图，轮胎的二边是由左、右两面镜子中看到的。开始，要花点时间把轮胎固定起来，再拍第一个全息图。然后，向轮胎喷一些热空气并在同一照相底片上进行第二次曝光。如果轮胎是完好的，仅有少许宽间距的条纹出现，表示几乎是均匀地膨胀。但如果橡胶层的胶结处是不完善的话，就会有一个小气泡出现，如从图中可以看到，在靠近中心和靠近左拐角顶部，它只有千分之几毫米高，但这个缺陷却可以造成严重后果。另一方法是把第一个全息图显影，再严格地把它重新放置到原来的位置而活生生地观察轮胎的膨胀。

图23示出了非破坏性检验的其它例子，其中的所有缺陷都不可能或几乎不可能用其它办法检测出来，但用全息照相法就会将它们明确无误地揭示在眼前。

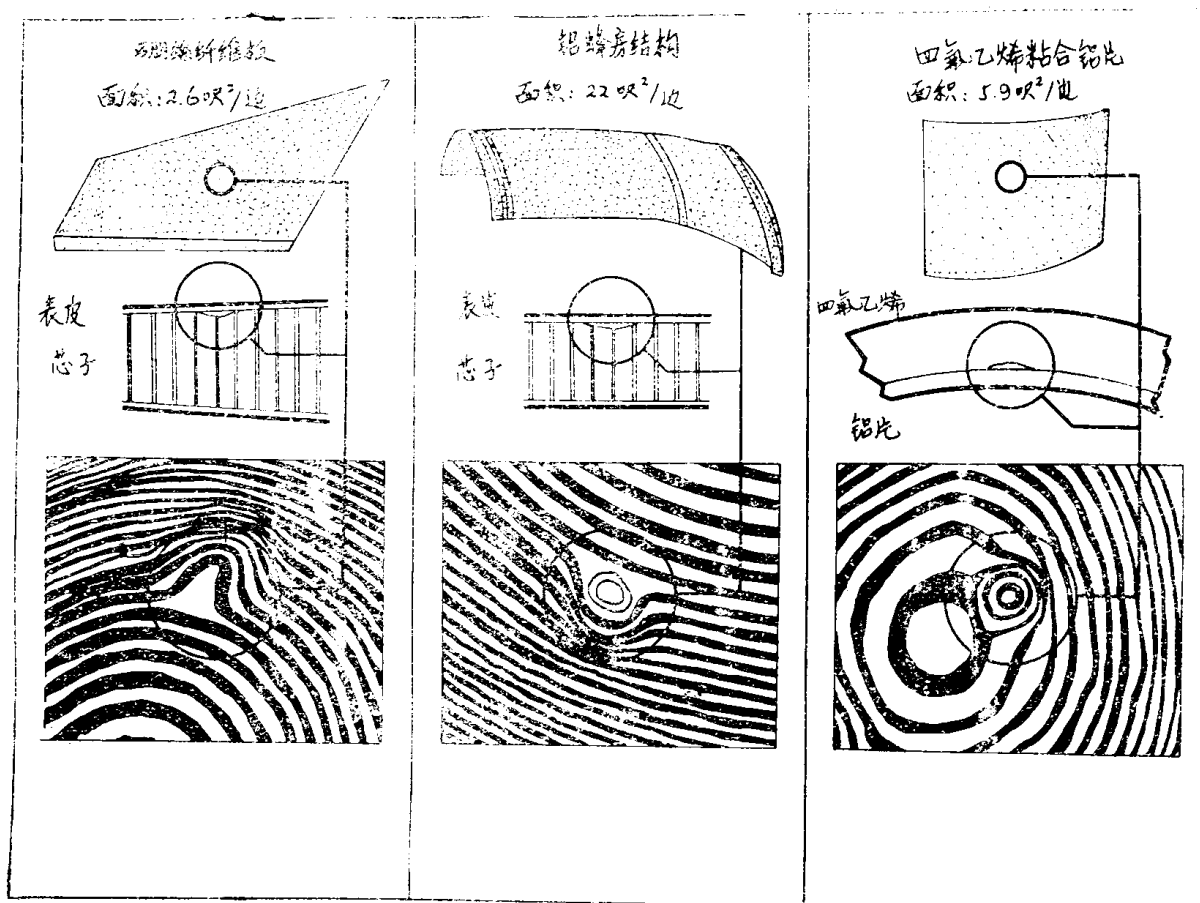
一个给人深刻印象的样品示于图24。它是一个全息照像分析器，用来检测作机翼的蜂房式夹层结构（如示于图23中间部份）。在铝壳和蜂房结构中间最小的焊接缺陷一眼就可以正确检测出来。



图22. 用全息照相的非破坏性检验。二次曝光全息图，显露出一一个轮胎中的二个缺陷。

虽然，全息干涉计量术完全适于检测很小的形变，但由于它的干涉条纹单位是 $1/4000$ 毫米，这对于检验工件的精度是太精细了一点。因此，称为“等高线”的另一全息照像技术是合适的。它首先由Haines和Hidebrand在1965年引入〔13〕，最近，也在美国密执安州由J. Varner作了很大的改进。这一方法是用波长差为百分之一的二种波长，拍摄同一物体的二个全息图。这样，在二个干涉条纹系统间产生了差拍，条纹间隔约为 $1/40$ 毫米，这正是工厂所需要的（图25略）。

我现在从工业应用转到全息照像的另一重要发展。在1962年，即刚在“全息照像大发展”之前，苏联物理学家 Yu. N. Denisyuk 发表了一篇重要的论文〔13〕，在该文中他将全息照象与彩色照相法结合起来（这种彩色照相法是由 Gabriel Lippmann 于1908年所提出来的）。图26说明了 Lippmann 的方法和 Denisyuk 的想法。Lippmann 用胶质的臭化银制作了一种很微细的乳胶，乳胶背面裱上一层水银当作一面镜子。投射到乳剂上的光线被镜面反射，产生了一系列驻波。胶质的银粒在电矢量最大值处沉淀下来，形成间距十分接近半波长的银层。在显影后，用白光照射这个银层结构，仅与原始光色相近的很窄一个波段的光才被反射，因为，仅仅对于这种色光在 Lippmann 层散射的子波才是同相相加。



这个蜂房结构的外皮是由17级硼丝纤维板焊层组成。如从底图中看到，在芯子和表皮间有一未熔合处被全息法检测出来。这部份适当的热应力形成正对着这个缺陷上的干涉条纹的不连续性。

这个复杂的铝蜂房结构导管很快由HNDT检查出来。结果显示在照片上，在照片上全息图干涉条纹绘出检测面积上的轮廓。HNDT读数与检测部份直接相关，小到一个细胞大小的缺陷也能检测出来。

四氟乙烯与铝的粘合从聚乙烯一面观察几分钟就能检测出来。如果需要的话，HNDT读数图案可以拍照作为永久记录。

图23. 全息照像非破坏性检验 (HNDT) 的一些实例。

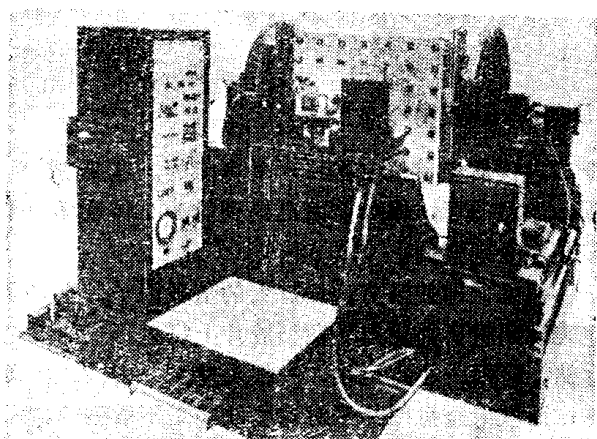


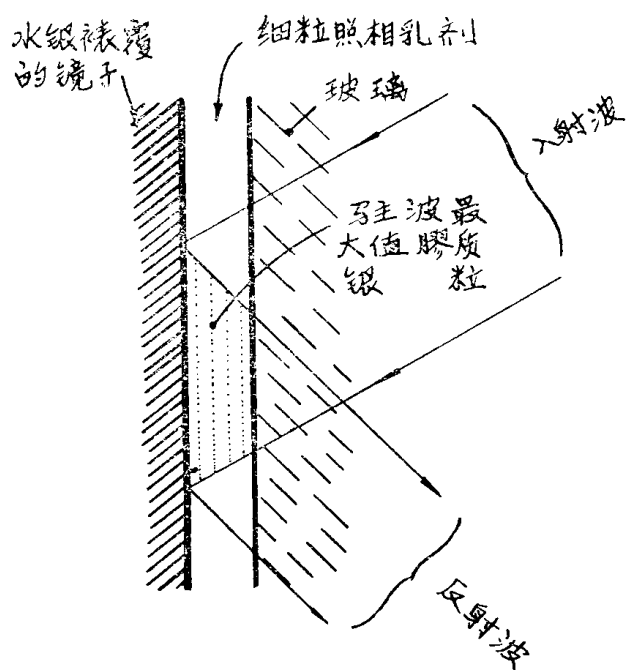
图24. 供检测夹层结构的全息分析器(Mark II)。

Denisyuk的建议示于第二图中。物波和参考波分别从乳胶的两边射来。再一次形成驻波和Lipp-

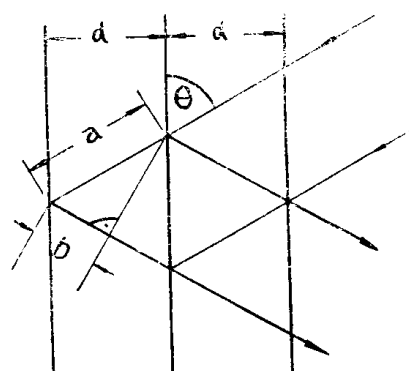
mann层，但它们不再平行于乳胶表面，而是等分两波前间的夹角。现在，如果用参考波照射显影后的乳胶，物体将在原来位置並以原来的颜色出现（除非乳胶被弄皱了）。这就是Denisyuk原理。

虽然，Denisyuk显示出相当高的实验技能，但由于1962年时没有激光，他只能得到一个“存在的证明”。一张能用白光照射的彩色反射全息图是在1965年第一次由G.W. Stroke和A. Labeyrie [14a] 得到的，随后，由L.H. Lin, K. S. Pennington, G. W. Stroke和A. Labeyrie所作的这种全息图的二色改进型示于图27 (略) [14b]。

从那时以来，单色反射全息图由K.S. Pennington 等人用新的照相过程达到了很完善的地步，有接近百分之百的反射能力 [15]。但二色或三色以上全息图仍然远不够使人满意。改进这种情况是我现在的主要任务之一。但由于篇幅有限，就不在此赘述，



Lippmann-Bragg 条件



$$a + b = n\lambda \quad \text{or}$$

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

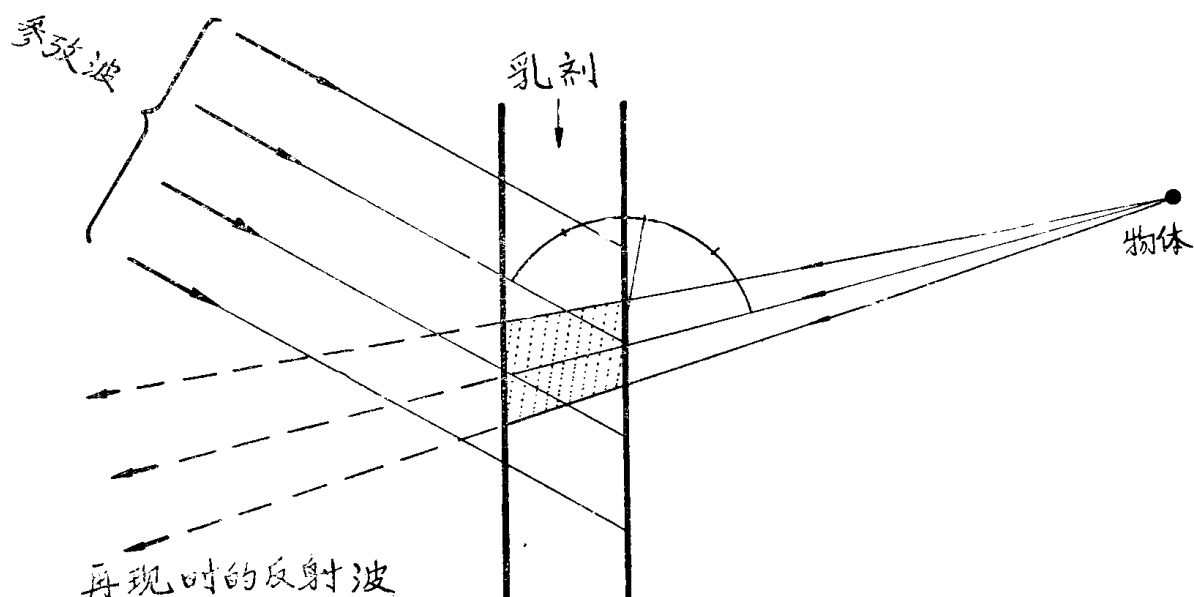


图26. 彩色的Lippmann-Denisjuk反射全息照像

而且也时过早。

全息照像今后定会获得很重要的一种应用是信息存储。我前面已经叙述过，全息照像在给定的乳剂中能比普通的显微照片多存储100—300倍的印刷件。即使没有利用乳剂的厚度，倍数因子也超过50。原因是一张散射的全息图几乎代表理想的密码，它充分利用了乳剂的面积和层次，而印刷件只用了5—10%的面积，层次则完全没有利用。更大的倍数因子可由利用乳剂的体积、厚度来实现。这方面的可能性在1963年首先由 P. J. Van Heerden 在他的论文中指出来〔16〕。理论上，在大约一个波长立方体积内存储一

个二进位信息单位（必特）是可能的。这要成为实际，还差的远，但如前面已提到的300倍这样一个数值是完全现实的。

但是，即使没有这样巨大的倍数因子，全息存储也表现出重要的优点。微型胶片上棋盘形式的二进位存储，可因一小点尘埃，一根头发或一点抓损而毁坏，而散射全息图几乎对这些缺陷是不敏感的。示于图28的全息存储，照它的作者 L. K. Anderson 所说〔17〕，仅是一个初步的开始，但它已经能够达到在大约一微秒内选取信息为（例如）任何64×64印刷页的标准。1.2毫米直径的每一全息图能够包含大约10⁶

必特。随后，在一微秒内读出这些信息自然会要求一个不可能实现的波带，但有效的平行阅读设备是可以提供出来的。人们可以期望，一旦数据库的设计认真开始，这个“初步的开始”就会出现巨大的扩展。

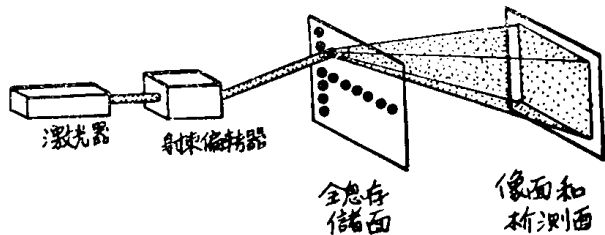


图28. 全息飞点存储

全息照像的另一重要应用（或许仅仅处于早期阶段）是图形和字符辨认。我只能简略地提到A. Van-der Lugt在图形辨认这方面所作的基本工作〔18〕。我只藉助图29就足以说明字符辨认的基本原理。

让我们稍许概括一下全息照像的基本原理。在所有前面的例子中，一个复杂物体射束是与一个简单的平面或球面参考射束相干涉；然后，用参考射束照明全息图而再现物体射束。但是，少量数学计算证明，前面所述能够扩展到任何与它自身尖锐相关的参考射束。这个自身相关的函数是射束的一个不变量，它可以在任何横切面上计算。人们立即可以看到，一个球

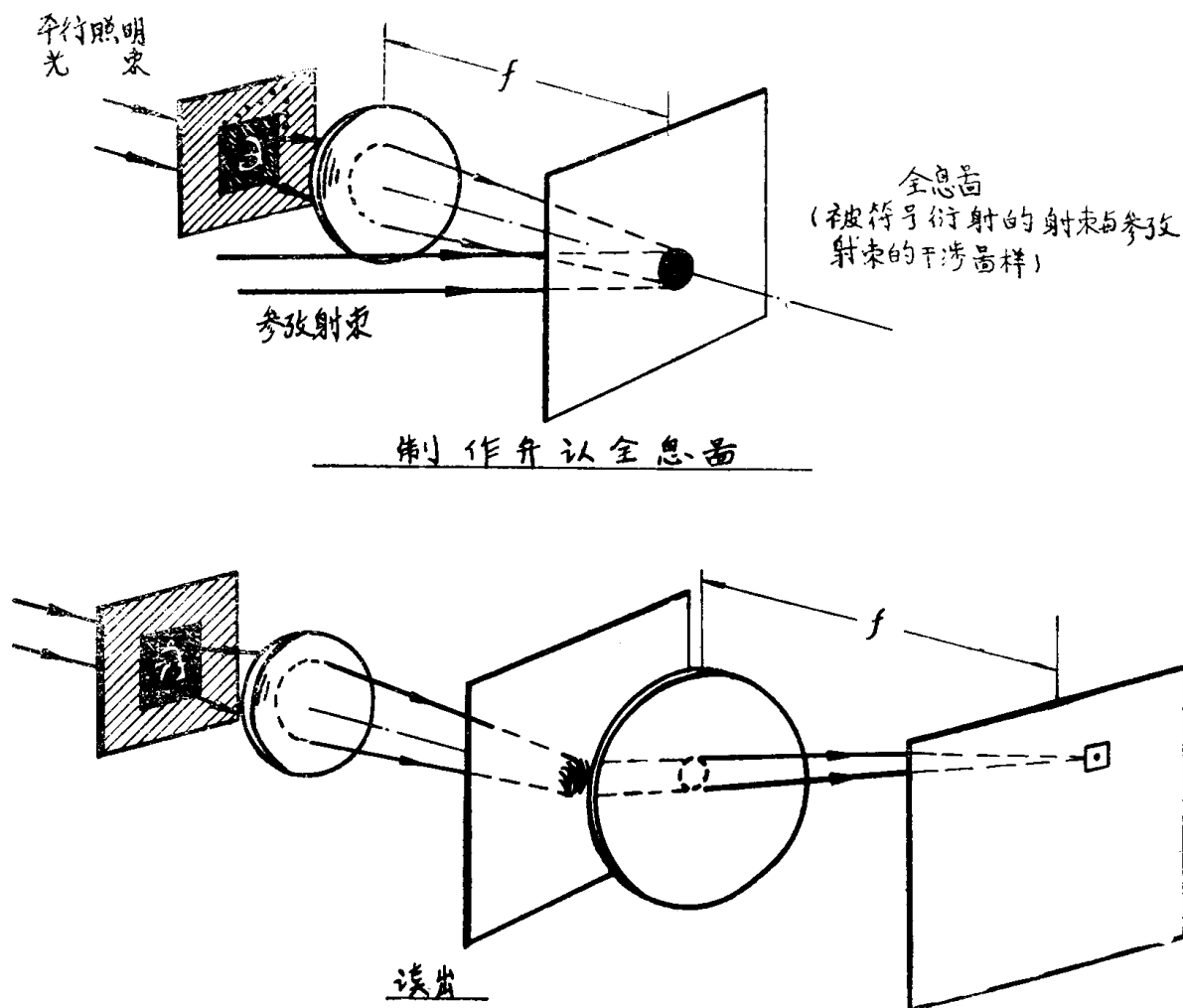


图29. 用全息照像的字符识别。

面波是与它自身尖锐相关的，因为它是从一个“点”发出来的。但是，也存在着与其本身尖锐相关的其它射束，例如，从一个指纹，或从一个汉字发出来的射束，或一个极端情况，从一块乳白玻璃发出来的射束。因此，藉助全息图翻译汉字为相应的英语或相反都是完全可能的。最近，Loughborough大学的Butters博士和M. Wall已创制了一些全息图，它从

一个人像产生本人的签名或相反。换句话说，全息图可以是一个万能的翻译者。例如，它可以把我们能读的符号翻译成为一种机器能读的符号。

图29表示出了这个原理的初步的现实化。用一个平面参考射束作一个字母“a”的全息图。当这张全息图用字母“a”来照射时，参考束就再现，並可以激发例如在某一位置的一个小光电池。我相信，上面已

给出了这个基本原理的思想。当然，用它来作成实际装置还需要作很多工作，因为，印刷文字的方法很多，但这会使我花太长时间，以致不能解释如何处理这类问题和其它的困难。

有了字符辨认装置，我们就已经向未来跨进了半步，因为这些大概只对下一代的计算机或自动机才成为重要的，对于他们，我们必须传授更多一点人类智慧。我现在要简要地叙述某些其它问题，它们都是向将来跨进半步或半步多的问题。

问题之一，这已经是很实际的，是克服激光斑痕。每一个第一次看到激光的人，会对我们认为是光滑物体的粗糙外貌感到惊异。一张白纸，看起来如像有许多蚂蚁在爬行着。这种爬行的感觉是由于眼睛的不稳定性所造成，但粗糙却是真实的。它被称为“激光斑痕”，图30表明了它的一个典型例子。这是用低倍率光学系统观测时，一张白纸在激光中的外貌。它事实上不是噪声，而是我们不需要的、即我们不感兴趣的纸的极微小的凸凹不平所造成的信息。我们怎能消除它们呢？

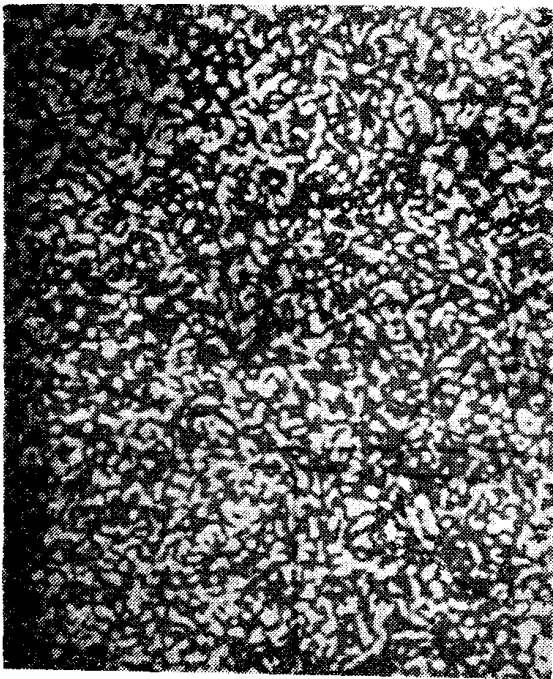


图30。激光斑痕。例如，用激光均匀照射一张白纸的外貌。

对粗糙物体而言，答案是，很遗憾，我们所能作的一切是取一个较大面积的平均，这样就抹平了各个偏差。但这意味着，我们不得不丢掉很大一部分信息，包括需要的和不需要的。这是很可惜的，但我们没有别的办法。在很多情况下，我们有很多讯息要丢掉，如我已示出的散射全息图的一些再现能有很满意的外观上可以看出。但是，有一些重要的领域，在其

中我们能够作更多的事情，并且，也是急需改进的。这就是供存储和显示的微型全息图。它们被作成散射全息图，以便摆脱尘埃和抓损之害。但由于把它们作成散射性的，就引入了斑痕。为了避免斑痕，今日这样的全息图被作得较理想需要的大得多。最近，我已经证明〔19〕，散射全息图的优点几乎完全可以保留，而斑痕则可以用一个特殊的照明系统代替乳白玻璃而完全消除掉。在全息存储的信息密度方面，按上所述，我希望会有进一步的改进。

现在，让我们以更急进的步伐来谈谈未来。我要简略地叙述两个我所爱好的全息照像的设想。其中之一是全景全息照像，或者，也可称之为全息艺术。

到目前为止，所制成的三维全息图仅仅扩展到几米的深度。不能把他们延伸到无限远吗？人们能否贴一张全息图在墙上，使它象一个窗口，通过这个窗口看到风景（实的或虚的）呢？我认为这是能够作到的，只是它将不是一个照片而是一个艺术工作。图31说明了这个过程。艺术家制作一个模型，把它装饰成使其看起来合乎透视的要求，并且，当通过一个如全息图一样大小的透镜观看时，所见之像能延伸到任何距离。艺术家在作模型时，可用一个较小的，刚够遮住他的两个眼睛的透镜。用这个模型做成一个反射全息图，并用一个强的小光源照明它。观察者将看到通过透镜在底片上所摄下来的东西，即一个延伸到任何距离的彩色景物。这个计划在研究之中，但要做到满意还需要做很多工作，因为我们首先必须大大地改进三色全息图的反射能力。

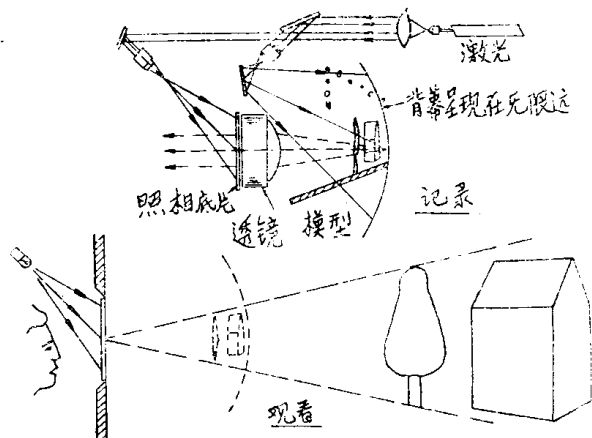


图31.全景全息照像

一个更远大的计划（或许在遥远的将来）是不要借助偏振镜一类元件观看的三维电影。这个问题在图32中草绘出来了。观众被宽度为两眼正常间距的二条视带遮盖着，一条对着左眼，一条对着右眼，在两对

视带间隔着一空白间隔。两眼必须观看二个不同的图景，一个立体对。观看者可以使头部向左 右稍 许移动。即使当他把一支眼睛移到空白间隔中时，图像显得暗淡一点，但仍然不是平的，因为一支眼睛仍然给出了“有错觉的立体”印象。

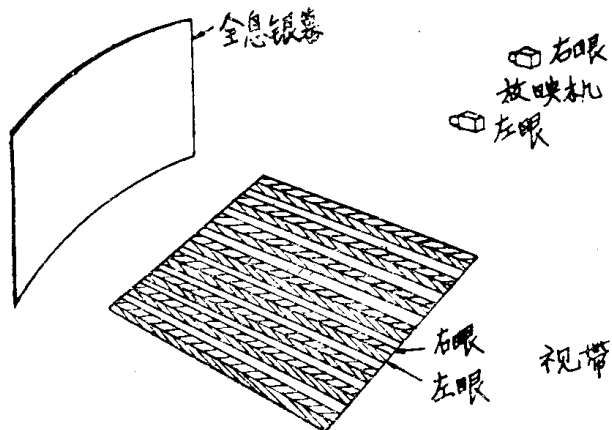


图32. 用全息银幕的三维电影。

在全息照像之前，我已在这个问题上花了若干年工作时间了，直到我不得不承认，用传统的光学方法（透镜的，平面镜的，棱镜的），严格地说，是不能解决这个问题的。人们可以给小剧场作一个满意的小银幕，但对大剧场和大银幕，人们就会陷入一种进退两难的景况。如果透镜或这一类物体大的话，它们会被前排的座位上看到；如果它们小的话，对后面的座位，将没有足够的清晰度。

几年以前，我出乎意外地认识到，全息照像也同样能解决这个问题。用一个放映机作为参考源，例如，用左边视带系统作为目标。用 Lippmann 乳剂所涂覆的银幕，当一个图象从放映机投射出来时，银幕本身自动地成为这样一个复杂的光学系统，即它只能从左边视带观看到。对右边放映机和右边视带也重复同样过程。在体积全息图的情况下，(Lippmann—Denisyuk)全息图表现出定向选择的现象。如果人们将照明器从原始位置移动某一角度，将没有反射发生。我们置二个放映机，彼此相离这个角度（或稍多一些），这样，发生的效果就是用左眼看不到右边的图象，反之亦然。

自然，还留有一个困难，这就是人们不能实施剧场那样规模的全息照像和用银幕那么大的底片。但这也能解决，就是用小块来拼成银幕，不要剧场而用剧场的模型，通过透镜观看，很像用于全景全息照像中的那样。

我希望，已经说出了这个计划的可实现性，同时，我确信也已指出了它的困难。我不能确知，这些困难能否在本世纪或下世纪克服。

一些宏大的计划（对此我有一个特别的倾向性），为了实现它们，已花了很长的时间。如我在开始时所说的，如果我能活着的时候，看到全息电子显微镜的实现，我将是幸运的（这方面的工作，我在24年前就已经开始了）。但我以为是有希望的，因此，由于 G. W. Stroke 的巨大成就使我很受鼓舞 [20]，G. W. Stroke 的成就示于图33中。Stroke 教授用他的扫描透射电子显微镜，经过一个全息滤光过程，对消除 Abert Grewe 教授所摄的显微图上的模糊地方最近已经获得成功，从而改进了分辨率，从 5 Å 到 2.5 Å（估计值）。严格说来，这并不是全息电子显微镜，因为原物不是用相干电子所作，但由于 A. Crewe 和 G. W. Stroke 所用技术是如此有效，以致我相信他们也能完成今后更重要的一步。

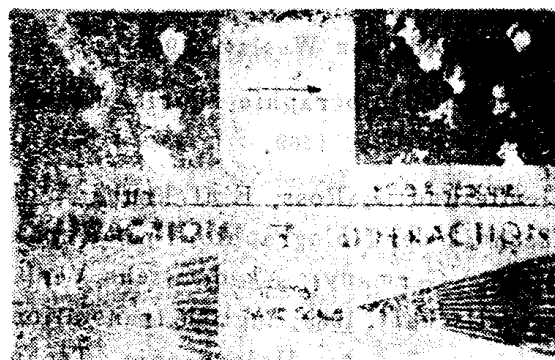


图33. 扫描透射电子显微照片（A. Crewe），用全息照像消除模糊（G. W. Stroke, 1971）。下面的照片证实，用高反差晒片效果並未能获得，因为，出现在原物上具有相反位相的某些空间频率必须进行相位校正。（图上：electron Micrograph of virus —— 病毒的电子显微图，sharpened by Holography —— 用全息照相法使鲜明，5 Å Blur — 5 Å 模糊，2.5 Å resolved — 2.5 Å 分辨率，Tests: same scale — 测试：同一标度。）

书目和参考文献

有成百位作者对全息照像的发展有过重要的贡献，要对他们作出恰当的评价是不可能的。论文的数量超过2000，并且，以各种文字出版的书籍有一打以上。

一个更为广泛的书目，例如，可以在 T. Kallard 编著的“Holography”中找到。

书目:

- E. S. Barrekette, W. E. Kock, T. Ose, J. Tsujiuchi, and G. W. Stroke, Eds., *Applications of Holography*. New York: Plenum, 1971.
- H. J. Caulfield and S. Lu, *The Applications of Holography*. New York: Wiley-Interscience, 1970.
- R. J. Collier, C. B. Burckhardt, and L. H. Lin, *Optical Holography*. New York: Academic Press, 1971.
- J. B. DeVelis and G. O. Reynolds, *Theory and Applications of Holography*. Reading, Mass.: Addison Wesley, 1967.
- M. Francon, *Holographie*. Paris, France: Masson et Cie, 1969.
- H. Kiemle und D. Ross, *Einführung in die Technik der Holographie*. Frankfurt am Main, Germany: Akademische Verlagsgesellschaft, 1969. English translation: *Introduction to Holographic Techniques*. New York: Plenum 1972, in Print.
- W. E. Kock, *Lasers and Holography (An Introduction to Coherent Optics)*. Garden City, N. Y.: Doubleday, 1969 (Russian translation, Moscow, USSR: Mir, 1967).
- Yu. I. Ostrovsky, *Holography (in Russian)*. Leningrad, USSR: Nauka, 1970.
- E. R. Robertson and J. M. Harvey, Eds., *The Engineering Uses of Holography*. Cambridge, England: Cambridge Univ. Press, 1970.
- G. W. Stroke, *An Introduction to Coherent Optics and Holography*. New York: Academic Press, 1st ed. 1966, 2nd ed. 1969.
- J. C. Vienot, P. Smigielski, and H. Royer, *Holographie Optique (Developpements, Applications)*. Paris, France: Dunod, 1971.

参考文献

- [1] D. Gabor, "A new microscopic Principle," *Nature*, Vol. 161, pp. 777—778, 1948.
—, "Microscopy by reconstructed wavefronts," *Proc. Roy. Soc.*, vol. A197, pp. 454—487, 1949.
—, "Microscopy by reconstructed wavefronts: I," *Proc. Roy. Soc. (London)*, vol. 64, pt. 6, pp. 449—469, 1951.
- [2] G. L. Rogers, "Experiments in diffraction microscopy," *Proc. Roy. Soc. (Edinburgh)*, vol. 63A, P. 193, 1952.
- [3] A. Baez, "Resolving Power in diffraction microscopy," *Nature*, vol. 169, pp. 963—964, 1952.
- [4] H. M. A. El-Sum and P. Kirkpatrick, "Microscopy by reconstructed wavefronts," *Phys. Rev.*, vol. 85, p. 763, 1952.
- [5] D. Gabor and W. P. Goss, "Interference microscope with total wavefront reconstruction," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 56, pp. 849—858, 1966.
- [6] L. J. Cutrona, E. N. Leith, L. J. Porcello, and W. E. Vivian, "On the application of coherent optical processing techniques to synthetic aperture radar," *Proc. IEEE*, vol. 54, pp. 1026—1032, Aug. 1966.
- [7] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Wavefront reconstruction with continuous tone transparencies," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 53, p. 522, 1963.
—, "Wavefront reconstruction with continuous-tone objects," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 53, pp. 1377—1381, 1963.
- [8] From D. Gabor, W. E. Kock, and G. W. Stroke, "Holography," *Science*, vol. 173, pp. 11—23, 1971. This is one of the first 3-D diffused light holograms recorded by G. W. Stroke at the University of Michigan, where he originated this work. An early reference is G. W. Stroke, "Theoretical and experimental foundations of high-resolution optical ho-