

全息学原理

H. M. 史密斯 著

科学出版社

全息学原理

H. M. 史密斯 著

中国科学院物理所 译校
《全息学原理》翻译组



科学出版社

1973

内 容 简 介

本书比较系统地论述了全息照相术的基本原理和实践中的问题，并介绍了全息术的各种用途。在引论性的第一、二章之后，用比较简洁的方式处理了全息学的一般理论和成象分辨率问题。然后讨论了若干实验问题。第七章专门论述彩色全息图。最后介绍全息术在各个方面的应用。

本书适于有关方面的工作人员和相应专业的师生阅读。

HOWARD M. SMITH

PRINCIPLES OF HOLOGRAPHY

John Wiley and Sons, Inc., Interscience, New York, 1969

全 息 学 原 理

H. M. 史密斯 著

中国科学院物理所 译校
《全息学原理》翻译组

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1972年10月第一版 开本：787×1092 1/32

1973年10月第二次印刷 印张：8 1/2

印数：7,801—17,150 字数：191,000

统一书号：15031·45

本社书号：121·15—4

定 价：0.90 元

译者序

全息术，或称全息照相术，是一种新的、具有它独特优点的记录与显示形象的方法。自从激光器问世以来，全息术得到了迅速的发展和广泛的试用。今天，全息术已经成为激光应用的一个重要领域，它已与科学研究、新技术的发展以及工业生产的许多方面发生联系，其基本原理也已经应用于超声全息术和微波全息术。

为了适应我国激光应用技术发展的需要，并且在一定意义上为了推广这项新技术，我们遵照伟大领袖毛主席“**洋为中用**”的教导，选译了这本“全息学原理”，供科研和生产部门广大革命工人和科技人员参考。对于这本译文，如同一切外国文化一样，应当遵循毛主席的有关教导，要进行分析 and 批判，吸取其中正确的东西，通过试验，为我所用。

本书比较系统地论述了全息术的基本理论和实践中的若干问题，并介绍了它的各种应用。由于原书成书时间较早并受着重点的限制，所以对于应用方面的介绍是不够的。另外，原书中若干公式，甚至个别叙述有错误，我们已在译文中加以订正。

由于我们水平所限，译文中难免仍有错误之处，希读者提出批评指正。

71.673
1(2)

目 录

译者序	
第一章 历史导言	1
第二章 全息术的基本装置	15
2.0 导言	15
2.1 全息术的基本叙述	15
2.2 记录平面全息图的装置	27
2.3 记录体积全息图的装置	30
第三章 平面全息图的一般理论	37
3.0 导言	37
3.1 记号	37
3.2 分析	39
3.2.1 费涅尔全息图	39
3.2.2 夫琅和费全息图	47
3.3 位相全息图	54
3.3.1 引言	54
3.3.2 分析	55
第四章 体积全息图的一般理论	61
4.0 导言	61
4.1 三维条纹	62
4.2 三维光栅产生的衍射	65
4.2.1 三维光栅方程	65
4.2.2 光瞳函数 $G(x, z)$	69
4.2.3 布喇格条件	71

• i •

4.2.4	波长改变	75
4.2.5	取向灵敏性	77
4.2.6	波长灵敏性	82
4.3	反射全息图	85
第五章	影响像分辨率的因素	92
5.0	导言	92
5.1	参考光束和照明光束的光源大小	92
5.2	参考光束和照明光束的带宽	102
5.3	记录介质的影响	106
5.3.1	引言	106
5.3.2	富里叶变换全息图	106
5.3.3	费涅尔全息图	111
5.4	三级相差	122
5.4.1	引言	122
5.4.2	分析	122
5.4.2.1	放大率	124
5.4.2.2	三级像差	126
第六章	实践中的若干考虑	132
6.0	全息术所用的光源	132
6.0.1	气体激光器	132
6.0.1.1	时间相干性	132
6.0.1.2	空间相干性	141
6.0.2	固体激光器	142
6.0.3	线光源	149
6.1	全息术所用的记录介质	151
6.1.1	分辨率和带宽要求	151
6.1.1.1	信号的记录	151
6.1.1.2	视场的记录	153
A.	富里叶变换全息图	153

B. 费涅尔全息图	155
C. 无透镜富里叶变换全息图	156
6.1.2 记录介质的转移特性	157
6.1.2.1 引言	157
6.1.2.2 分析	157
6.1.2.3 转移曲线	162
A. 振幅透射率对曝光量的曲线	163
B. 振幅透射率对曝光量对数的曲线	168
C. 黑度对曝光量对数的曲线	170
6.1.2.4 实验	172
A. 引言	172
B. 振幅透射率	172
C. 一级光通量对零级光通量的比值作为黑度的 函数	173
D. 光束衡量比	174
E. 物体大小	177
6.2 物体运动	178
6.2.1 引言	178
6.2.2 全息图作为一个时间滤波器	179
6.2.3 物体的直线运动	180
6.2.4 物体线性运动对于像的效应	184
6.2.5 物体的振动运动	186
6.2.6 物体的振动运动对于像的效应	188
6.2.7 记录介质运动的效应	190
第七章 彩色全息术	195
7.0 导言	195
7.1 分析	197
7.2 色度学	206
第八章 全息术的应用	209
8.0 导言	209

8.1	全息干涉计量术	210
8.1.1	引言	210
8.1.2	单次曝光全息干涉计量术	211
8.1.3	二次曝光全息干涉计量术	218
8.1.4	时间平均全息干涉计量术	222
8.1.5	等高轮廓线的产生	224
8.2	用全息图校正具有像差的波前	227
8.3	匹配滤波及字符辨识	231
8.4	全息显微术	237
8.5	通过漫射介质成像	241
8.6	三维观察	243
8.7	信息存储	244
8.7.1	引言	244
8.7.2	相干迭加与非相干迭加	245
8.7.3	存储容量	248
8.8	超声全息术	254
附 录	使用透镜的富里叶变换	257
A.0	引言	257
A.1	分析	257

第一章 历史导言

自从1900年以来,人们通过照相方法,几乎对他们眼睛所能观察到的任何景物都已经能够进行记录并作为永久记录保存下来。在几个世纪以前就已经发明和应用了光学透镜,而在1900年左右,对于如何用透镜形成光学的像已有了充分的理解。随着照相法的发明,大大提高了透镜在科学研究中的重要性。透镜和照相乳胶幸运地结合起来,使得有可能制出星体、行星和银河系的图,记录光学光谱,制出微小样品在显微镜下的图形,以记录下来的小型像的方式存储大量数据,并开辟了无数其它用途。由于它在科学上的广泛的重要性,照相学这门科学在过去70多年里是在不断地发展,甚至直至今日,新的和重要的用途还仍不断有所发现。

现在,科学已经提出了一种形成光学像的新方法,那就是全息术。

全息术是一种比较新的方法,它在某些方面与照相术相似,但两者仍然是根本上不同的。由于这个根本差别,全息术与照相术不会在同一领域中相竞争。对于某几种用途,全息术比照相术较为适合,但与此同时,照相术的大多数重要用途并未受到挑战。此外,有好几种任务能采用全息术来完成,但用通常的照相术却完全做不到。

为了指出全息术与照相术之间的根本差别,我们应该一般地了解它们各自是如何起作用的。

照相术基本上提供了一种方法,借以记录一个像的二维辐照度分布。一般地讲,每个“景物”由极大数量的发光的

(即反射光或辐射光的)点子所组成。由每一个基元点发出的光波都投入到一个完整的光波中,组成所谓的“物体”光波。这个复合的光波被透镜用这样的方式进行变换,使之聚合成发光物体的像。就是这个像被记录在照相乳胶上。

全息术是与此很不相同的。应用全息术,所记录的并不是用光学方法形成的物体的像,而是物体光波本身。物体光波是用这样一种方式记录下来,使得后来即使物体已经移去,只要照明这个记录就能实现“再现”原始物体光波。这样,用眼观察这个再现的波前,就能看到这个物体或景物的图像,它与原始的物体或景物实际上不可分辨。因此,记录物体光波本身,而不是记录物体的一个像,这就构成全息术与一般照相术之间的根本差别。

在追述全息术的历史之前,简要地叙述一下如何记录物体光波将是有益的。我们开始考虑一单个单色光束,它来自一个非常小的光源。这个光束必须是单色的,并且是来自一个非常小的光源,这两个要求合起来构成这个光束相干性的条件。相干性的要求意味着这个光应当能够显示在时间上稳定的干涉效应。然后,将这单一的光束分裂为两个部分,令其中一个部分射向物体或景物,另一部分射向一个合适的记录介质,通常是照相胶片。射向物体的那个部分光束被该物体散射或衍射。这个散射光波构成物体光波,现在让它投射到记录介质上。直接向记录介质前进的光波称为参考光波。由于物体光波和参考光波是相互相干的,当它们在记录介质上相遇时它们将形成一个稳定的干涉图样。这个干涉图样是一个复杂的条纹系统——辐照度的空间变化,它被充分精细地记录在照相胶片上。干涉图样的微观细节与物体光波唯一地对应;不同的物体光波(物体)将产生不同的干涉图样。

这个干涉图样在照相乳胶上的精确而永久性的记录被称

为“全息图”，而由此导出“全息术”（或“全息学”）这一名词。这个照相记录（或全息图）现在由对应于所记录的干涉条纹的透明和不透明区域的复杂分布组成。当全息图用一束光照明，这光束与用来记录全息图的原始参考光束相似，则仅有透明区域让光透射，结果构成一个复杂的透射光波。而由于所记录的干涉条纹的作用，这个透射光波很方便地被分成三个分离的部分，其中之一精确地复制出原始的物体光波。观察这个重现的波前，就能看见原始物体的一个精确复型，虽然在重现过程中物体并不存在。这样，全息术就是一个两步成像的方法。第一步记录下一个复杂的干涉图样，成为一个全息图。第二步，用这样的方式照明全息图，使得透射光的一部分成为原始物体光波的一个精确复型。在这里，全息术与一般照相术之间的区别就十分清楚了。

这个光学成像的方法并不是一个真正的新方法。约廿年前，英国科学家加柏首先想到他所谓“光学成像的一种新的两步方法”^[1]。然而，只是在最近的几年内，这个方法才得到广泛的了解和应用。全息术之所以在现代获得新的生命力，是由于它需要等待激光器的普遍推广，这种激光具有很高的时间相干性和空间相干性；不过，对于加柏原始概念所作出的那些真正重要的贡献，在性质方面更为基本一些。

布喇格的 x-射线显微镜^[2]给加柏提示了这种两步成像的一般概念。布喇格曾经做到：用由照相记录下来的晶体点阵 x-射线衍射图样上发生的（第二次）衍射来构成晶体点阵的像。布喇格方法的基础概念就是一个二次衍射过程，这就是全息术方法的微妙之点。如果我们注意到：被一个物体衍射产生的场可以表示为物体上光分布的富里叶变换^[3]，那么二次衍射成像就很清楚了。这样，第二次衍射就成为物体富里叶变换的一个富里叶变换，它就是物体本身的一个像。这

表示由全息图上发生的衍射将复制出物体光波，只要这两次衍射的全部振幅和位相都保持不变。

正是这个保持位相的问题给布喇格方法带来了根本性的限制。因为它只能够记录辐照度而舍弃了位相信息。因此，他仅仅只能将这个方法应用于有限的几类物体，例如某些晶体点阵，对于这些点阵能够预断衍射场的绝对位相。要求保留位相信息，或者至少使位相的记录降居不重要的地位，这就是加柏方法的微妙之处。布喇格应用了这样一类物体，对于这类物体入射辐射线与衍射辐射线之间发生的位相改变是已知的，这样就绕过了位相问题。他应用具有对称中心的晶体，所有散射的辐射线不是与入射辐射线位相相同便是相差 180° 。这样，用照相方法记录下来的衍射图样就是记录了辐照度，但是没有失掉位相信息，而这个照片给出的另一次衍射恢复了原始的物体(光)波。

以后，伯格^[1]将布喇格方法推广用于没有对称中心的晶体，不过对这些晶体而言，位相改变是近似已知的。插入了适当安置的“移相器”之后，他能够重现出原始物体的真实光波。

加柏^[1]论证了衍射波的位相可以通过与一个标准的参考波相比较而确定，从而发展了上述的那些想法。他在衍射波上迭加了一个强的均匀辐射，那么只要这两者相互间是相干的，则后者的振幅将为衍射波所调制。最终得到经过调制的衍射波的照片就构成全息图。辐射波在全息图上发生的衍射就给出第二次衍射，结果得出原始波前的重现。

然而，情况并不像加柏开始时所认识到的那么简单。照相底片记录了衍射波经过调制的振幅，但它仍然没有将其绝对位相记录下来。加柏使衍射波相对于参考波较弱，因此合成波(衍射波加参考波)的位相总是近似地与参考波位相相同。这样，衍射波可以认为是具有与参考波相同的位相，而

只是振幅有变化。这个近似所得的结果引起产生两个波：一个是为物体衍射的原始波，另一个是所谓“孪生波”，它具有与参考波同样的振幅，但位相相反。关于波前重现（或“全息术”）早期工作^[1,5,6]的一大部分都是致力于消除这个孪生波效应。最近完全排除了这个问题^[7]，这是使全息术如此引人注目并重新获得广泛兴趣的主要原因之一。

加柏首次在 1948 年证实了全息术方法的可实现性^[8]。他所用的辐射就是光。把由一个汞弧得来的辐射加以滤光以得到所需的单色性；借助于照明一个针孔来得到所要求的空间相干性。他最初的目的是提高电子显微镜的分辨率。在当时，电子显微镜分辨率的理论极限约为 5 \AA ，这是由适当兼顾了电子物镜的衍射与球面像差的效果而确定的。因为在那个时期，对电子物镜像差任何进一步修正看来都难以实现，加柏论证了如果用电子束制作全息图，然后用光波进行重现，那么只要光线光学的像差精确地与电子光学的像差相匹配，就能得到无像差的像。他所提议的程序是：将物体置于电子束内，正好位于缩小的电子源的像的前面。由物体衍射的电子构成全息图，将此全息图记录在离物体有一段距离的照相底片上。然后，按照光波波长对电子波波长的比例将此全息图加以光学放大，再用一个光波照明，这个照明光波应具有如上同样的比值标度，并与电子波具有同样像差。于是，从理论上讲，通过全息图可以看到犹如处在原来位置的物体，它是按光波波长对电子波波长的比值放大的了，即大约放大 100,000 倍。

由于某些技术上的困难，例如机械的和电的稳定性问题，这个方法没有能够成功。后来，海因等人提出了一个改进的装置，它扩大了能应用的领域，因而放宽了对电稳定性的要求^[9]。在这个所谓“透射方法”中，把透镜安置在物体与全息

图之间以放大衍射图样。这将提高照相底片的有效分辨率。所需要的仪器基本上与早期的电子显微镜完全相同,这样就使得物体位置容易固定。

海因等人曾致力于实现这种方法,但又一次由于实践中的限制而未能成功^[10]。他们尽可能地排除上述那些问题,但难于将样品稳定地放在电子束内,所以在设法达到约 6 \AA 的衍射分辨率后,不能再进一步提高。因为必须在曝光期内,即数分钟以内,保持物体相对于物镜的稳定,不得超出数埃的误差。在光学重现阶段还遇到另外一些困难。

重现中最严重的问题就是孪生光波引起的干扰。由于在全息图上记录位相有大小为 π 的不确定性,所以有两个可能的物体在全息图上能产生同样的曝光量分布。其中之一是原来的物体,另一个是虚物体,与前者对称地位于光源的后面。在重现中,会构成两个物体所发出的光波。因此,人们在观察真实物体的像的时候,必须通过虚物体的离焦像这样一个背景来进行观看,这是一个最令人生厌的干扰。加柏^[11]注意到如果采用一个聚光系统来形成光源的一个缩小的像,那么这个系统的像差就会严重地影响孪生像。这样,这个孪生像将显得很模糊,而此时原始物体的像会显得很清晰,因为在重现中对原始物体像的像差已进行了补偿。加柏^[11]也提出了另一种方法:在重现过程中在点光源的适当地形成的一个像上放置一个屏蔽“掩模”。这样,让含有真实物体信息的光波大部分通过,而背景大部分被压制。布喇格等人^[5]提出:由于重现实际上是物体的聚焦像加上一个共轭物体的全息图,可以制作共轭物体的另一全息图,然后将它从原来的全息图中减去。这个减去的办法就是将第二个全息图与原来的全息图迭合。第二个全息图具有的高透射率的区域恰好落在不需要的像的黑度高的区域上,反之亦然,这样背景就成为均匀的了。

要将两者配准,要求极高的精确性,因此妨碍了这个方法的完全成功,不过孪生像的效应是被减弱了^[5,6]。

与早期试图利用全息术以改进电子显微镜的工作并行的有一些科学工作者致力于制作x-射线全息图。埃尔萨姆^[6]将一条细丝的x-射线衍射条纹的印制图片再照相,这样来制作这个细丝的人工的x-射线全息图。他用从这个全息图来的光设法得到一个适度的重现,至少证明了x-射线全息术的可实现性。巴耶兹^[12]对这个问题作了一个理论探讨,也断定用x-射线制作全息图并重现是可以实现的。不过,他也注意到,由于底片分辨率以及光源大小的限制性,用可见光才可以得到有用的分辨率。关于x-射线全息术的进一步工作,还有待于获得小的、单色x-射线源。

罗杰斯等人^[13,14,15]曾致力于提出更满意的概念性的解释,此外,全息术这个课题停顿了大约十年之久。在几本光学教科书^[16,17]中发表的关于全息术原理的简略解释,差不多就表述了这一长时期内关于这一课题的全部发表的工作。这种方法的发展之所以受到很严重的限制,就在于缺少一个在x-射线或光学波段的强的相干光源以及孪生光波干扰的存在。数量级达到一小时的曝光时间并非罕见的^[6],而重现中,分辨率从未达到过理论预期的数值。

当利思等人^[7]提出了一种方法,即用很简单的手段完全能消除掉孪生光波,这时人们对这个领域又重新感到兴趣。他们从通讯理论的观点来叙述全息术方法,认识到如果信号信息(即由物体衍射的波前)能够被迭置于一个载频(即离轴参考光波)之上,则两个重现的光波应当就是这个过程的边带,并且实际上可以彼此分开。从光学的观点来讲,如果令由物体衍射的光波与一个离轴的(而并非同轴的)参考光波相干涉,则所成的全息图会具有一种光栅型的结构。重现过程将给

出两个光波，代表光栅的两个一级衍射。这两个光波之中的一个与由物体来的原始光波相同；另一个就是不需要的孪生光波。这样就实现了两个光波在空间中实际的分离，也就排除了孪生光波的干扰效应。加柏^[1]曾注意到这种情况的改变有可能发生，当时他说“……很可能在可以应用光束分离器的光辐射光学中能够寻找到一种提供相干背景的方法，这个方法能使物体平面更好地分开，并且比我们研究过的简单装置更有效地消除‘孪生光波’的效应。”巴耶兹^[2]在1952年曾很接近地提出“离轴”的概念，当他在解释全息图如何通过衍射而形成像时提到：“衍射光栅能够以一种模拟的方式形成光源的一个虚像”。

这样，利思等人的想法重新激发了对全息术的兴趣。许多人对它开始注意并试着进行几个简单的实验。这个“孪生光波”不再被称为“不需要的像”，而是被证明为全息术方法中的一种有用的附属物。虽然离轴参考光波的概念是一个明显的进展，但仍然存在光学部件上出现尘埃或其它缺陷这类问题。透镜或反射镜上极细微的尘埃斑点会产生它自己的全息图，减小全息图的有效孔径，并且作为噪声重现出来。埃尔萨姆^[6]及其他人为了消除这种噪声源花费了很大力量，他们把尽可能多的光学部件加以转动，这样来使非静止的尘埃质点产生的全息图被“涂抹”掉。这个方法在一定程度获得成功，但是却极不实用。此后的发展也排除了这个问题。

新的离轴参考光束方法的另一优点是排除了严格的底片处理。为了保证全息图曝光量线性地转换为振幅透射率，原始的方法要求将全息图这样处理，即使其 γ （反衬度）尽量接近于2。在加柏的技术中，透射率-曝光量转换关系中的任何非线性都会引起背景光强水平的变化，从而使像的反衬度降低。在这个新技术中，记录介质的任何非线性主要是导致高

级衍射的出现。这些高级衍射的衍射角大于一级衍射波的角度，因此非线性记录对于所需要的像没有什么大的影响。更令人惊喜的是：采用这个新方法时，如果将底片处理成具有更高的反衬度，从而增大了记录的非线性，在实际上还更有好处。一个高反衬度的全息图可以得出更明亮的像，而高阶项产生的干扰效应很小。

这个离轴参考光束方法还能排除物体上不同点之间的自干涉效应。在早期的方法中，这个自干涉产生一种雾状辉光，环绕在像的周围。在新的方法中，这个噪声项可以完全避免。

最后，新的方法对于那种使大部分入射光不能透过的物体以及明暗连续变化的物体都能够实现波前重现。在早期的技术中，要求通过物体的光的主要部分是未被衍射的。这部分未经衍射的光然后被由物体衍射的光稍加调制。这样就将记录过程中位相信息的损失降低到可以略去的程度；全息图记录平面上总扰动的合成位相几乎就等于背景光波的位相。当这个全息图仅用背景光波照明时，可以近似得出原始总扰动的位相，并能得到一个可辨识的重现（光波）。在新的方法中，全息图上总扰动的位相是作为光栅形条纹图样的位相调制而被记录下来的。这就使得完全新的一类物体的波前重现成为可能，这类物体不允许入射光的一大部分透射，例如在不透明背景上的透明字样以及明暗连续变化的物体。

这样，由利思等人引入的新方法就排除了原始方法中许多令人烦恼的特有性质；但全息术之真正重新获得生命力尚有待于另外两个重要进展，它们不久就会实现的。

约在利思等人引入离轴参考光束方法的同时（1962年），人们开始制作并应用一种根本不同的光源，后来证明这种光源极其适用于全息术，这就是激光器。激光器能够产生非常强的单色辐射，这种辐射正好处于能用照相机记录的波段。由于