

GUANG XUE QUAN XI

光学全息

天津大学王永昭 编

机械工业出版社

光 学 全 息

天津大学王永昭 编

机 械 工 业 出 版 社

光 学 全 惠

天津大学王永昭 编

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $10 \frac{1}{2}$ · 字数 227 千字
1981年8月北京第一版 · 1981年8月北京第一次印刷

印数 0,001—3,100 · 定价 1.10 元

*

统一书号: 15033 · 5051

前 言

本书是根据高等院校一机部对口专业座谈会拟定的教材计划编写的。编写时力求以通俗的语言并从实用出发，向读者介绍了光学全息的基础知识、基本原理、重要技术及全息的应用。

全书共八章分四个部份：第一到第二章属于基础知识；第三到第五章为原理部份，这部份包括平面全息图的数学描写及几何分析，体积全息图的衍射理论；第六章到第七章为全息技术发展方面，着重讨论与全息发展密切相关的两大器件——记录介质及激光器；第六章介绍现有的各种记录介质；第七章从记录全息图本身的需要出发，扼要地介绍气体激光器、固体激光器及脉冲全息技术，并讨论全息实验中的若干灵巧技术；第八章基本上是从应用的原理出发，编写了全息在多方面的应用。

“光学全息”拟为工科高等院校的光学仪器及其他有关专业的高年级学生、研究生的选修教材及教学参考书。也可供从事激光全息研究的工程科技人员参考。

本书在基本理论方面是以 R. J. 柯利尔 (R. J. Collier)、C. B. 伯克特 (C. B. Burckhardt)、L. H. 林 (L. H. Lin) 合著的“光学全息” (Optical Holography) 一书为主进行编写；在全息技术应用方面吸取了利思 (E. N. Leith) 和易仲生 (Charlss. IH) 等人著作的有关内容；以及编者本人近十年来从事激光全息科研的体会而编写的。由于时间及水平的限

IV

制，书中一定会有不妥之处甚至错误，恳请读者批评指正。

本书由天津大学精密仪器系吴继宗副教授对原书稿进行了全面审阅。北京工业学院于美文副教授对全书作了精心修改。天津大学精密仪器系张以谟同志，浙江大学光学仪器系孙杨远、陈文斌同志，中国科学院物理所陈岩松等同志对本书部份章节都提过宝贵的意见，在此一并表示感谢。

编者

一九八〇年五月

目 录

前言

第一章 概论	1
§ 1-1 引言	1
§ 1-2 光学全息概述	7
一、同轴全息图	12
二、离轴全息图	14
三、象平面全息图	15
四、傅里叶变换全息图	18
五、白光再现反射全息图	20
第二章 傅里叶变换及光的传播与衍射	24
§ 2-1 傅里叶变换	25
一、光学系统与傅里叶变换	26
二、卷积运算	30
三、其他对应运算	33
四、几个傅里叶变换的对应函数	35
§ 2-2 光波的传播与衍射	37
一、单色平面波	37
二、波动方程的解	38
三、光波的传播	40
四、由周期性物体所产生的衍射	42
五、一般衍射问题	45
六、与非涅耳-基尔霍夫积分的关系	47
§ 2-3 透镜的傅里叶变换性质	53

一、球面透镜的作用	54
二、物体紧靠透镜	57
三、物体位于透镜的前焦面上	59
第三章 相干与全息图的记录及再现	63
§ 3-1 互相干函数	63
§ 3-2 条纹可见度与相干度的关系	66
§ 3-3 光源的相干性	68
§ 3-4 全息图的记录与再现	71
§ 3-5 离轴全息图衍射波的分离	77
§ 3-6 实象的产生	86
§ 3-7 傅里叶变换全息图	89
§ 3-8 准傅里叶变换全息图	92
§ 3-9 无透镜傅里叶变换全息图	95
第四章 平面全息图的分析	98
§ 4-1 参考光与物光的位相差	98
一、同轴全息图	102
二、离轴全息图	104
三、无透镜傅里叶变换全息图	106
§ 4-2 全息中的成象关系及其放大率	108
§ 4-3 典型光路的成象特性	112
一、盖伯型全息图的成象	112
二、利思-乌帕特尼克斯型全息图的成象	114
§ 4-4 三级象差	118
§ 4-5 位相全息图	119
§ 4-6 平面全息图的最大衍射效率	123
第五章 体积全息图的衍射	127
§ 5-1 由两平面波形成的各种全息图	127
§ 5-2 布喇格定律	130
§ 5-3 耦合波理论	132

§ 5-4 波动方程	132
§ 5-5 波动方程的解	139
§ 5-6 透射全息图	144
一、位相透射全息图	146
二、吸收透射全息图	150
§ 5-7 反射全息图	153
一、位相反射全息图	156
二、吸收反射全息图	159
§ 5-8 体积全息图特性的讨论	161
第六章 全息记录介质	164
§ 6-1 分辨率对记录视场的影响	164
一、菲涅耳全息图	167
二、傅里叶变换全息图	168
三、无透镜傅里叶变换全息图	169
§ 6-2 振幅透射率与曝光量曲线	170
§ 6-3 线性最佳技术	176
§ 6-4 调制传递函数的确定	181
§ 6-5 银盐全息干版	187
一、光谱灵敏度和分辨率	190
二、漂白全息图	190
§ 6-6 重铬酸盐明胶胶片	193
一、全息图的记录方法	194
二、胶片的准备	195
三、灵敏度和分辨率	196
四、曝光特性	197
五、处理	197
§ 6-7 光导热塑片	200
一、光导热塑片记录和擦掉的过程	200
二、影响记录质量的几个因素	202

§ 6-8 其他记录材料	206
一、电光材料	206
二、硫砷玻璃	207
三、硅酸铋和锆酸铋	208
第七章 实践中的若干技术	210
§ 7-1 空间相干性的要求	211
§ 7-2 实现单频运转的方法	215
§ 7-3 红宝石脉冲激光器的工作特性	217
一、单模脉冲激光器	219
二、Q 开关	220
三、脉冲相干长度的测定	223
§ 7-4 脉冲激光全息记录系统	225
一、振荡器-放大器的结构	225
二、参考光束的考虑	226
三、单频脉冲的记录光路	227
四、周围振动和照明的影响	227
五、允许物体的最大位移	229
六、可靠性方面的考虑	231
§ 7-5 全息记录中的最佳条纹可见度	234
§ 7-6 实验中的灵巧技术	241
一、偏振效应的调节	241
二、实时法中提高条纹可见度的途径	242
三、振动位相的确定	243
四、提高干涉系统的灵敏度	244
五、将全息象拍摄为普通照片的技术要点	245
第八章 全息的应用	246
§ 8-1 引言	246
§ 8-2 全息干涉量度术	247
一、一次曝光全息干涉法	248

二、双曝光全息干涉法	250
三、连续曝光全息干涉法	252
四、全息干涉量度用于无损检验	256
五、等高轮廓线的产生	260
§ 8-3 散斑干涉	264
一、噪音中的散斑效应	264
二、散斑干涉	265
三、用散斑法测定面内位移	269
§ 8-4 全息相关	274
一、相关与干涉量度术	274
二、光学匹配滤波器及全息相关	276
§ 8-5 用全息法校正透镜象差	284
一、全息滤波法的原理	284
二、全息校正方法的原理	285
三、球差和象散校正的例子	288
§ 8-6 全息显微术	289
§ 8-7 全息光学元件	291
一、全息透镜	291
二、全息光栅	293
§ 8-8 全息在光学处理中的应用	296
一、光学空间滤波	297
二、全息图的滤波运算	299
§ 8-9 全息信息存贮	301
§ 8-10 通过位相畸变介质的成象	302
一、消除位相畸变的象全息图法	303
二、采用共轭参考光法	304
三、使物光和参考光等畸变	304
§ 8-11 三维显示	306
一、积分照相	307

X

二、合成全息	308
三、白光透射全息图	311
§ 8-12 计算机产生全息图	313
一、干涉条纹型的全息图	314
二、利用孔径的大小及其位置的修正——罗曼型全息图	315
三、多孔径法	319
四、开诺型（相息图）	320

第一章 概 论

§ 1-1 导 言

大约在十八世纪后半期，人们就已经懂得将光学透镜和感光材料结合起来，用以进行普通照相。随着科学技术日新月异地向前发展，普通摄影技术，例如在可见光范围的航空摄影、高速摄影、显微摄影；在不可见光范围的红外、紫外及 x 射线摄影等等；在许多学科领域中，对于人们在探索了解自然界的奥妙，已成为一种不可缺少的手段。

无疑，普通摄影技术在未来的发展中，仍将不断地得到提高和扩大它的应用领域。

但是，普通摄影技术的一个共同不足之处，就是当空间三维的景物被拍成普通照片以后，便完全丢失了立体的效应。普通照片与真实物体有着很大的差别。因此，如果能对真实的景物作一模一样的记录，在摄影学方面将是一项重大的突破。

早在一九四八年，英国科学家丹尼斯·盖伯（Dennis Gabor）提出了一种新的成象原理，称为全息术（Holography），这一名词是引用希腊字“Holos”而得名的，是“完全”的意思。我国译为“全息”意即完全信息。采用全息原理，不用摄影物镜可以记录物体真正的三维影象。由于他的这一发明及后来全息方法的发展，盖伯于一九七一年获得诺贝尔物理学奖金。

全息术是利用干涉原理来记录波前的一门科学。因此被记录的对象必需用相干光照明，从记录物体上衍射的光波与另一束参考光波在记录介质上产生干涉。如果光波具有高度的相干性，也就是其干涉花样的强度分布在可以观察到这种效应的时间里，物波和参考波之间的相对位相保持为常数。将这些干涉花样记录下来并经过一定的处理程序，便形成全息图。全息术是一种两步成象过程，第一步是记录，即将能使光波再现的振幅信息和位相信息记录在某种介质上。第二步是用参考光来照明全息图，便可以实现波前再现。

全息术的唯一特征是存贮了能使物体恢复原状的位相信息。相比之下，普通照相只能存贮被摄物体光强度的空间分布。强度是光波全部位相平均的一个量值。在全息记录中引进了本质性的概念——参考光束。借助这一参考光波，在物体的振幅和位相信息没有到达记录介质之前就将其进行编码。其所以要采用参考光是因为物理的探测器或记录元件只对光强度敏感，所接收的也只是光的平均强度，由于光波频率很高而不能反应其位相。实际上，位相只有当两束相干的光波同时到达同一个地点，才能表现出来。当两束光波叠加成为一束光波时，其强度不仅依赖于每一束光波各自的强度，同时也依赖于这两束光波之间的位相差。这就是全息记录的关键。

全息术本来是打算给电子显微镜工作者提供一种工具，使之能用来观察原子大小的物质。就在全息术发明之前，即一九四七年，电子显微物镜的分辨率为 10 埃数量级。当时也已认识到适当地兼顾电子物镜的衍射及球差的影响，电子显微镜分辨率的理论极限为 5 埃。但当时要对电子物镜的象差再作进一步的校正看来是比较困难的。盖伯发现，由透镜

所产生的这个象差象，仍然贮存着物体的全部信息。如果稍微采用一下编码的形式，并能够运用某种方法对这个象差象进行译码，那么电子显微镜的分辨极限或许可以减少到1埃。当时他论证了如果用电子束制作全息图，然后用可见光波进行再现，就能得到无象差的象。从而可以观察到原子的结构。

盖伯提议完全省去电子显微镜的物镜，并将物体衍射的非聚焦的电子波在记录材料上进行编码运算。然后将记录了电子波的全息图再由相干可见光照明进行译码。这时将产生一个原来物体放大的光学象。为了得到这个结果，照明全息图的光束必须精确地按一定比例模仿电子束。这个放大系数就是光波波长和电子束波长的比率。

这种不用成象物镜而采用两步光波成象的显微术，是起源于结晶学中应用 x 射线的学术界。因为在晶体中对原子排列的研究，还找不到一种能使 x 射线成象的透镜。早在一九二九年，布喇格（Bragg）已经能够在一种晶体中产生原子结构的光学象。他的方法就是一种傅里叶光学综合。即光在空间的分布、特别是晶体中原子的光学象，可以分解为傅里叶（Fourier）成份，也就是一组正弦波花样。这种两次衍射过程也可作为两个连续傅里叶变换的过程用数学的方法来加以讨论，物体的夫琅和费（Fraunhofer）花样可以近似地看为物体的傅里叶变换。第二次衍射或第二次变换可以使物体函数复原。

布喇格发现，通常所搜集到的 x 射线衍射的数据，包含有这些正弦波花样的振幅和方向，当时他的任务是要根据这些数据形成一些图案，并将这些图案叠加在照相干版上。这一工作他称之为“ x 射线显微镜”。但是 x 射线照相不能记

录傅里叶变换的全部信息，其振幅可以作为强度的平方根找到，但衍射花样中的位相已被丢失。因此布喇格只能将这种方法应用于几种特殊的物体，例如对那些晶体点阵能够预先判断到衍射场的绝对位相。这样入射的 x 射线和衍射的 x 射线之间发生的位相改变便是已知的。从而避开了位相这一难题。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就是记录了复振幅。位相信息没有丢失。这张照片给出的第二次衍射便恢复了原始的物体波。

盖伯在他一九四八年发表的文章中就谈到“ x 射线显微镜”曾经是他自己思考的出发点。在这基础之上创立了全息术。他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。为了对他的理论进行验证，盖伯用可见光代替电子波制成了第一张全息图。他用一个汞灯作为光源，加了滤光片来得到一定的单色性，借助一个针孔滤波器使之达到所要求的空间相干性。他在物体的衍射波上叠加了一个强的均匀照明，只要这两束光可以相干，则参考波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，这就构成全息图。照明光波在全息图上所产生的衍射就是第二次衍射，这便是原始波前的再现。然而情况并不象盖伯所认识到的那样简单，盖伯使参考波强于衍射波，但合成波(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，可以认为衍射波的位相与参考波的位相一致，而只是振幅有变化。结果在同一方向上产生两个波，一个是物体所衍射的原始波，另一个是所谓“孪生波”，它具有与参考波相同的振幅，但位相相反。全息术早期的大部分工作都是致力于消除这个孪生波的影响。但由于某些技

术上的困难，如光源及稳定性问题。虽然盖伯将工作推移到光学领域已证明是一个正确的方向，但真正得到发展的只是在激光器出现以后才有可能。

盖伯的文章发表两年以后，罗杰斯 (Rogers) 发表了一篇论文，叙述了全息图与波带片的相似性。并为傅里叶分析应用于全息术而打下了基础。斯坦福大学物理教授克尔帕屈立克 (Kirkpatrick) 了解到光学领域里的这些新发展，于是鼓励他的一个学生选择全息术作为他的博士论文题目，这篇论文也成为以后在这方面的标准参考文献之一。到一九六一年以前，除英国的少数科学家和德国罗曼 (Lohmann) 的著作外，几乎一直沉默到一九六三年才迅速地复兴起来（而这时盖伯似乎已经把全息术忘记了）。

密致安大学从事过雷达研究工作的利思 (Leith) 和乌帕特尼克斯 (Upatnieks) 发现波前再现与通讯工程中有相似之处，很象一个调制的载频系统。从这里出发，他们提出一种方法，用很简单的手段完全能使孪生的光波分离。即如果将信号信息（物体衍射的光波）叠加在一个载频（离轴参考光波）上，则两个再现的光波应当就是这个过程的边带，并且可以彼此分开。从光学的观点来看，如果使物体衍射的光波与一个离轴的（而不是盖伯那种同轴的）参考波相干，则所形成的全息图就相当于是一种光栅结构的形式。再现过程将给出两个光波。即为光栅的两个一级衍射波。但这两个光波在空间实际上已分离，从而排除了孪生波的干扰。

利思和乌帕特尼克斯的成就不仅是由于激光器的出现（实际上激光器的迅速实用与利思等人发展了离轴全息记录方法几乎是同时发生的），而且还由于他们作了长期的理论准备工作。他们还引入了漫射照明的方法，从而使记录介质

上的信息大为丰富起来，也使所记录的物体显得更为清晰。更加引人入胜的是如果全息图被摔碎，就其中的任一小块仍然可以形成原物体完整的再现现象。当然分辨率相应的下降。

差不多与利思等人同时取得进展，丹尼苏克(Denisjuk)提出了白光再现反射全息图原理。

一九六四年后期，全息术几乎成了光学研究中最活跃的领域。在以后的几年中一直都有发明和创造，就在这期间研究了好几种彩色全息术，以及盛行于一九六九年的虹全息及以后的白光再现合成全息等。

在激光器的研究进程中，全息照相可算是激光器的第一项应用。正当学术界开始提出激光器究竟有什么实用价值时，全息记录方法已比较成熟了，于是可以说激光器总算有了一种实际的应用，即记录全息图。当然接之而来的是为全息术寻找用途。经过几年的研究和发展，捷足先登的是各种各样的全息干涉分析，而全息无损检验则是走在最前列。

全息术仍是一个年轻的学科领域，现在从事激光及全息术研究的科学工作者正在进行着大量的、振奋人心的应用和发展工作。从已出版的文献表明，一个有希望的新领域正在到来。

全息记录的原理可以适用于各种波动。如电子波、 x 射线、光波、微波和声波。只要这些波动过程在形成干涉花样时具有足够的相干性即可。实际上已经分别采用过上述这些波动形式记录过各种全息图。但是似乎是在电磁波谱的光学区域内进行全息记录最适宜，采用激光已取得巨大的进展。在更短的波段上由于缺乏相干光源而受到阻碍。在长波的一端是正在积极进行研究声全息，这种新技术正在发展。微波全息也取得某些成果。但进展都远不如光学全息。本书将集