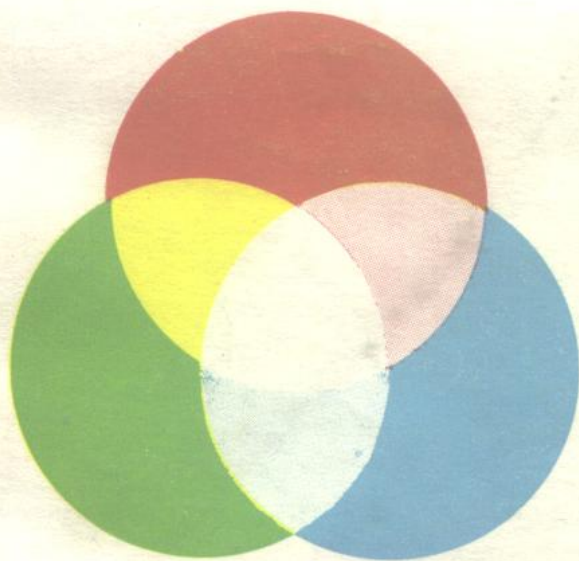


光全息学

R.J.科利尔
〔美〕 C.B.伯克哈特 著
L.H.林



机械工业出版社

光 全 息 学

R.J.科利尔
〔美〕 C.B.伯克哈特 著
L.H.林

盛尔镇 孙明经 译



机 械 工 业 出 版 社

721169

本书第一部分顺序地介绍了光全息学的基本原理、数理基础和各种全息图的形成和再现方法。除对平面全息图和体积全息图的特性和衍射效率作了分析外还应用了专门的章节对彩色全息图、合成全息图和计算机全息图的原理和制作方法作了分析,并讨论了全息图记录介质、冲洗处理方法、激光光源、散斑现象和噪声等问题。第二部分详细地介绍了光全息学在高分辨率成像、通过漫射介质成像、空间滤波、特征识别、信息存贮和编码、精密干涉测量、振动分析、等高线测量和三维图象显示等方面的用途。最后对全息图的复制、全息电视和非相干光全息图等课题作了探讨。

本书宜供近代光学及光全息学方面的科研人员和工程技术人员阅读,亦可供高等院校光学及有关专业的教学参考。

Optical Holography

Robert J. Collier

Christoph B. Burckhardt

Lawrence H. Lin

ACADEMIC PRESS, INC. 1971

* * *

光 全 息 学

R. J. 科利尔

〔美〕 C. B. 伯克哈特 著

L. H. 林

盛尔镇 孙明经 译

*

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)

轻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 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $17 \frac{5}{8}$ · 字数 464 千字

1983年2月北京第一版·1983年2月北京第一次印刷

印数 0,001—4,000 · 定价 2.20 元

*

统一书号: 15033·5404

序

电子显微镜学家、电学工程师、光学家、物理学家和化学家都曾为抚育全息摄影学有所贡献。激光器刚一发明，立即引起对这门综合学科的兴趣，关于全息图特性的研究由此大为开展。与此同时，用各种不同的科学语言写作的出版物亦因此潮涌而出，散见在多种不同的刊物之中。可以料到，每种出版物对读者所要求的基础知识水平很不相同。这些作品的混杂，很可能反而妨碍当代的研究者和继起的全息摄影技术的使用者相互交流。

本书是为了那些要学到全息学技术去解决各种技术问题的人写的。我们的企图是提供一个可以涌流革新的源泉。读者不需要比大学程度的科学或工程训练更多的基础。只要有初步光学知识，领会麦克斯韦方程，能够懂得傅里叶变换，就足够了。

本书集中论述由可见光所形成的全息图的特性。我们假定读者并不通晓最新的物理光学，因此把对全息摄影学起作用的基本光学概念先作一概述。然后用几何分析来解释简单全息图的一些特性。第四章到第六章可作为了解傅里叶光学的数学和物理学的简短课程，并为后继的第八章和第九章中的平面和体积全息图的理论打下基础。第七章是为了要动手搞出一张全息片再作进一步分析的人而插入的。这一章证实了要求一个连续波激光器的理由。指出了必需的光学技术，并描述使用有限设备就能做的一个简单试验。为得到更好的结果，实际的全息摄影者必须选择最适合他的目的的记录材料（第十章）。如果被摄物体是运动的，那末全息摄影者可以进展到第十一章的脉冲激光全息摄影术。

第十九章讲述用计算机产生的全息图。除此以外，全书的后半部讨论的是全息术的各种可能应用：高分辨率成象、通过漫射体成象、空间滤波、字符识别和编码、位移干涉测量和等值线描

IV

绘、信息存贮、单色和彩色立体显示及立体电视。在这一部分还展示了若干必须克服的问题，如低衍射效率、噪声、畸变、非线性、高分辨率记录材料的低感光特性，以及用激光照明全息图时出现的干扰散斑图案。

本书是用作学习的工具，不是对全息摄影学所作的贡献的目录。因此我们从有关全息学的大量文献中只选择了适合于这一用途的一部分。同理，每章末所附参考文献目录也只限于对各该章写作有影响的论文。

我们感谢贝尔电话研究所给予我们的支持，并向许多我们的同事所给予的个别协助衷心致谢。我们对 H. L. 包尚普先生和 E. T. 杜赫提先生帮助我们得到需要的全息片、照片和图片特别表示感谢。

目 录

序

第一章 基本概念简述	1
1.1 光全息学	3
1.2 光波	3
1.3 干涉图形	6
1.4 衍射	12
1.5 全息图的形成	14
1.6 波前再现	16
1.7 形成平面全息图和体积全息图的几何关系	18
1.8 全息学的基本公式	21
1.9 部分相干性	24
参考文献	32
第二章 早期的全息学	33
2.1 布拉格的X射线显微镜	33
2.2 电子显微术全息学	36
2.3 X射线全息学	39
2.4 光全息学的开始	39
2.5 共线全息图	44
2.6 离轴全息图	49
参考文献	52
第三章 点光源全息图的几何分析	54
3.1 物波—参考波位相差的计算	55
3.2 用一个点光源作波前再现	64
3.3 影象的特性	66
3.4 三级象差	73
参考文献	74
第四章 傅里叶变换	75

VI

4.1 线性空间不变系统和傅里叶变换	76
4.2 对应的变换关系	79
4.3 卷积运算	82
4.4 其它运算上的对应	87
4.5 函数的对应	90
参考文献	91
第五章 传播和衍射	92
5.1 波动方程及其单色解	92
5.2 平面波的解	93
5.3 周期性物体的衍射	97
5.4 一般衍射问题	100
5.5 与非涅耳—基尔霍夫积分的关系	102
参考文献	106
第六章 用球面透镜的光学系统	107
6.1 球面透镜	107
6.2 简单的光学系统	110
6.3 更一般的光学系统	115
6.4 有限大小的透镜的影响	124
6.5 相干和非相干传递函数	131
参考文献	132
第七章 光源和光学技术	133
7.1 形成全息图的光源	133
7.2 全息图记录的条纹可见度	147
7.3 使用经过扩束的激光束照明	158
7.4 激光束的分配和衰减	162
7.5 形成全息图时的机械稳定性	164
7.6 全息图的再现光源	165
7.7 简单全息摄影技术	169
参考文献	172
第八章 平面全息图的分析	173
8.1 用非漫射物光的离轴全息摄影	174
8.2 用漫射信号的离轴全息摄影	187

8.3	形成全息图的几何关系	195
8.4	记录介质的尺寸和分辨率的作用	208
8.5	平面全息图的最高效率	213
	参考文献	216
第九章	体积全息图的衍射	218
9.1	两平面波形成的全息图	218
9.2	布拉格定律	221
9.3	耦合波理论	222
9.4	波动方程	223
9.5	波动方程的解	228
9.6	透射全息图	233
9.7	反射全息图	241
9.8	体积全息图特性的讨论	248
	参考文献	251
第十章	记录全息图的材料	252
10.1	光敏材料的光学变化	252
10.2	曝光量和灵敏度	255
10.3	记录分辨率	256
10.4	全息图的存留和消逝	258
10.5	噪声和记录的直线性	258
10.6	理想的波前再现和理想的记录材料	259
10.7	现有材料曝光特性的表示	262
10.8	卤化银感光材料	265
10.9	重铬酸盐明胶片	277
10.10	光导热塑料胶片	283
10.11	光色材料	289
10.12	铁电晶体	290
	参考文献	292
第十一章	脉冲激光全息学	294
11.1	多模红宝石激光器	296
11.2	单频红宝石激光器	297
11.3	单频激光器的相干长度	299

11.4	红宝石放大器	301
11.5	光学元件的保护	304
11.6	形成脉冲激光全息图的装置	306
11.7	可容许的最大物体移动	311
11.8	对于被摄人体的安全照明	312
11.9	全息图的记录材料	314
	参考文献	316
第十二章 非线性记录、散斑和底片的颗粒噪声		318
12.1	非线性记录的影响	318
12.2	散斑图	325
12.3	底片的颗粒噪声	331
	参考文献	338
第十三章 实象的应用		339
13.1	显微术	339
13.2	悬浮质点的分析	343
13.3	通过位相畸变介质的成象	346
13.4	高分辨率的投影成象	353
13.5	多重象	354
	参考文献	356
第十四章 用空间调制参考波形成的全息图和全息图 空间滤波器		358
14.1	联合存贮	358
14.2	用空间调制参考波形成的傅氏变换全息图	363
14.3	应用傅氏变换全息图的几个实验	367
14.4	特征识别	370
14.5	多路传输和编码	384
14.6	影象处理	390
	参考文献	392
第十五章 全息干涉学		393
15.1	实时干涉法	394
15.2	双曝光干涉法	397
15.3	条纹的定位和分析	400

15.4	振动表面的干涉	410
15.5	等直线的产生	417
15.6	应用和改进	422
	参考文献	424
第十六章 信息存贮		426
16.1	微象存贮系统的组页	426
16.2	驻波光学存贮	429
16.3	厚介质中的全息存贮	432
16.4	全息飞点存贮	446
16.5	写、读和原地消逝	457
	参考文献	461
第十七章 彩色全息学		463
17.1	用激光作色光的混合	463
17.2	记录材料	468
17.3	单色象	469
17.4	消色象	469
17.5	由平面全息图产生的多色象	473
17.6	体积全息图的多色象	481
	参考文献	487
第十八章 合成全息图		489
18.1	影象分辨率和元素的大小	489
18.2	全息图的信息压缩	492
18.3	超体视和次体视全息图	497
18.4	全息图的宽角象	498
18.5	从照片合成三维图象	500
	参考文献	505
第十九章 计算机产生的全息图		507
19.1	抽样原理	508
19.2	离散傅氏变换和快速傅氏变换	513
19.3	二进制傅氏变换全息图	516
19.4	应用	523
19.5	相息图	524

X

参考文献	527
第二十章 发展中的三个课题：复制、电视传输和非相 干光全息图	528
20.1 全息图的复制	528
20.2 全息图的电视传输	536
20.3 用空间非相干物光形成的全息图	541
参考文献	544
附录	
I 空间频率域中的衍射公式和菲涅耳—基尔霍夫积分 的等价性	545
参考文献	547
II 电场的复数表示	548
参考文献	549
III 声束偏转器的容量速度积	550
参考文献	553

第一章 基本概念简述

激光器的发明使古老的光学重新活跃起来，使相干光的研究有了实用的意义，并使一些陈旧的概念获得新的希望。首先由丹尼斯·加伯于 1948 年发明的波前再现法就是其中的一项〔1.1〕。它的复兴主要是激光相干性的产物。波前再现，就是现在所谓的全息摄影，它是使物体的未聚焦衍射图案的记录再现物体影象的方法。加伯发明了改进电子显微镜影象分辨率的办法。虽然他未能用电子波证实其原理，但他用可见光把它证实了。当时没有足够强的相干辐射源，在可见光谱范围内也没有，全息摄影看来已被永远贬入光学古董之列。面临着许多障碍和仅有的一点结果，使它的早期研究者放弃了这个方法。10 年后，全息摄影好象已趋于无闻。这个暗淡的前途在 60 年代初期由于密执安大学科学技术研究所中进行的工作而重放光辉。1962 年，利思和乌帕尼克〔1.2〕开始发表了一系列报告，根据通信理论技术，为光全息学开辟了新的研究途径。到 1964 年，他们已确证全息摄影是实际可行的，而采用了激光是一个重要因素。用激光把摄影干板照明所产生的三维影象引起了所有目睹者的想象，并激发了许多人开始他们自己的研究以探测全息学的潜力。今天，全息学已广泛地被了解为存贮波前、并可从其记录中再现这些波前的实用手段。由摄影感光材料形成的这个记录叫做全息图。全息片和普通摄影底片不同，在它的表面上所见到的是没有影象的一片灰影（图 1.1），看不出它有什么成象本领。普通摄影使我们习惯于准备在干板或胶片上看到记录过程中所形成的二维影象。这就要求用一个镜头来收纳从每一物点发散出的光，并使其聚焦于影象的相应各点。全息片上没有影象细节，令人联想到全息摄影中可把成象镜头去掉，而实际上也正是如此。只要有一张感光片和一个相干参考波，

就可以把一个用激光照明的物体所散射而未经聚焦的光形成一个记录。这个未聚焦的光或衍射图形是来自许多物点的光波重迭而成的。用肉眼看来,这种图形的光强度均匀一片,尽管它好象毫无信息,但是当这一图形的适当记录(全息图)经过曝光、显影并被照明,就会在一定的空间范围内形成一个三维物体的影象。这个影象的位置和全息片有一定距离,具有真实物体通常所具备的深度和视差特性。

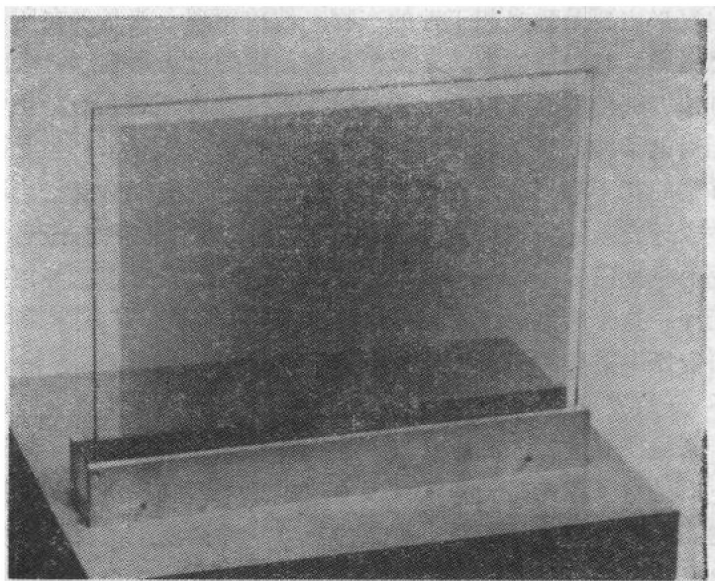


图1.1 一张全息图的照片

我们将要看到,全息摄影所涉及的远不止于形成三维的影象。进一步考察这一方法可以看出它的若干可能作用,包括信息存贮、干涉计量显微术和数据处理(因此在译文中有时简译作含义更广的“全息学”或“全息术”——译注),在这第一章中,对于理解全息摄影的基本概念只简略地作些介绍。有许多概括地提到的题目还要在以后各章中深入探讨。

1.1 光 全 息 学

全息摄影是用干涉方法来记录由相干光照明的物体所衍射的光波。使衍射波与一个在相位上相关的参考波发生干涉。如果这两种波是彼此高度相干的，那么物波和参考波的相对位相就不随时间改变，而产生可以看得见的有强度分布的干涉图形。这个图形的感光记录即全息片，包含着足以再现这些衍射波的振幅和位相的所有信息。当全息片用参考波照明时，就把衍射波的波前再现出来。

把相对位相的信息用便于再现的方式存贮起来，是全息术独特的特性。与此相反，普通摄影术只能存贮景物的光强在空间的分布。摄影镜头把这种空间分布描摹为聚焦的影象强度，而由曝露于该强度的感光乳剂经显影后所得到的银含量来记录这一强度。可是，这个强度是光波的全部位相的平均量，因此不包含物光原有的位相信息。全息学则利用一个参考波，在记录之前就用既包含振幅又包含位相的信息把未聚焦的物光强度进行编码。

全息学的方法可用于所有的波：电子波、X射线、光波、微波、声波和地震波，只要这些波有足够的相干性，并足以形成所需要的干涉图形。事实上，这些波的每一种都已经制成过全息图。看来电磁波谱中的可见光区域最适合于全息摄影。应用激光的光全息学的进展是爆炸性的，而使用更短波长的工作则由于缺乏相干波源而受阻滞。在波长尺度的另一端，目前正在开展着声全息学的活跃研究。形成声全息图的新技术在进展中，但成果仍处于初始阶段。因此，我们将把注意力集中到可见光和光全息学上。

在进一步解释全息方法以前，让我们复习一下物理光学中的某些有关方面。

1.2 光 波

弹性形变引起的机械能的传播、声和光的传播，都可以用波动来描述。机械能在海洋表面上传播时，其横向波动是很明显的。

压缩空气的声波则较难观察，我们只能把它在一个薄膜上的作用记录下来，去推论空气分子的运动，而不能直接观察它们。观察光波的传播困难更大。因为一个光波的电场和磁场的振荡频率高达 10^{16} 赫兹，现在还没有能快速响应到足以记录光波瞬值的敏感元件。

汤姆斯·杨在 1802 年首先证实了光是作为波而传播的。根据来自同一个波前不同点的光所发生的干涉，杨氏推论出了波的性质。他在一个屏上观察到来自两个二次光源的光的重迭，并发现了光的强度既有加强，也有抵消。这是在微粒论的基础上难以说明，而为波动理论所易于解释的。杨氏为了获得两光源产生干涉所作的实验布置如图 1.2 所示。由平行光照明的针孔 P_0 衍射一个球面波，射向有两针孔 P_1 和 P_2 的遮光屏。这两个针孔对球面波前取样后，衍射成在位相上彼此相关的两个次级球面波。在一个与第一屏平行，并放在两波相迭处的观察屏 S 上，观察到明暗相间的干涉图形。这些直线条纹与联接 P_1 和 P_2 的直线相垂直。对光的波动性的观察和全息图的形成是紧密相联的。两者都依赖于相干光波相交处有明暗相间的空间图形或条纹强度的记录。这个空间图案叫做干涉图形或驻波图形。驻波图的意思是条纹强度在空间的分布不随时间改变。由于在时间上比较稳定，杨氏才能观察到实验中所产生的条纹，而同时测量出条纹的强度和间隔。条

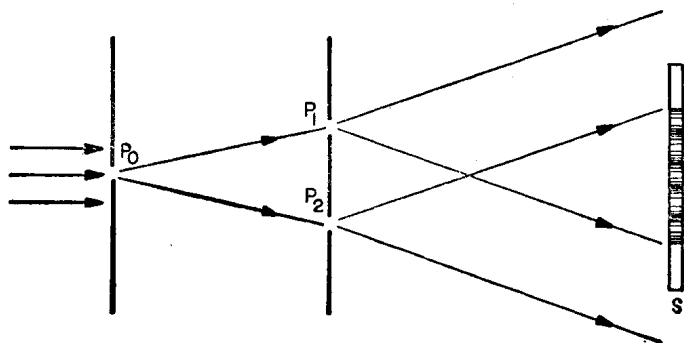


图1.2 杨氏双孔实验

纹图形的形成说明光具有波动特性。测量条纹图案的间隔和衬度可以显示波的性质，例如波长和相干度。

尽管不能直接看到光波场的振荡，但是预言电磁波或光波的麦克斯韦理论证明了它们的存在。麦克斯韦理论预言了光波中有电场和磁场两个矢量力场的存在。这两个场不需任何已知介质的帮助而在空间传播。我们所能观察到的只有它们和物质相互作用的时间平均效应。全息摄影涉及光波与感光物质的相互作用，即与感光乳剂中的卤化银粒的相互作用。因此，很容易做出这样的假定：由于存在两个力场，二者都可能与记录介质互相作用。但

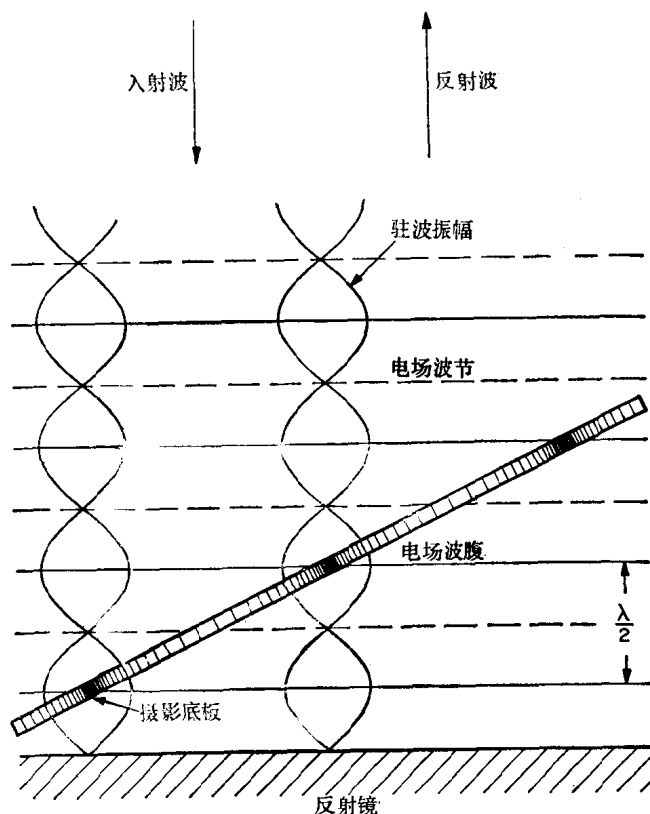


图1.3 维纳实验

(本书图书底板应为底板，图板应为图版)

当考虑到维纳 (1890) 所做的驻波实验 (图 1.3) 的一个结果时, 这一顾虑即可解除。维纳曾经证明光驻波图形大多在电场的波腹区域使感光底片感光, 而完全不在磁场的波腹区域。因此, 只有电场是在形成全息图时起主要作用的光场分量。这不仅对感光乳剂而且对已用于形成全息图的所有感光介质都是如此 (光与电子相互作用, 而起作用的这些电子或者是静止的、或者以小于光速的速度缓慢移动, 因此, 磁场对罗伦兹电磁力的贡献是可以忽略不计的)。在全息图的形成中可以略去磁场, 而把电场当作光波的唯一分量来处理。在非磁性材料上形成的全息图, 在进行再现时也只有电场的作用是主要的。

1.3 干涉图形

把全息图记录下来, 本质上就是对干涉图形强度的计量。如果相干波场之间的位相在时间上有一定程度的稳定, 那么干涉图形上强度条纹的空间分布也会有某种程度的稳定。在本节中, 我们将研究这些图形的强度。为此, 我们仅考虑从一个连续振源产生的波长完全相等的单色波。这就是我们假定的完全相干光的理想情况, 即相对位相和干涉图形强度在时间上绝对稳定。在这样的简化之下, 以上事实就更加明显。关于部分相干光的情况则将在第 1.9 节中考虑。

在没有继续下去以前, 我们必须把光和感光介质相互作用的意义弄得更加准确一些。一单位体积的感光乳剂的变黑量或一单位体积的光色材料的漂白量是该单位体积中在与光的振动周期相比长得多的时间内所吸收能量的平均值的函数。根据麦克斯韦理论的能量定律, 单位体积的能量或在光波电场中的能量密度 u 在 MKS 单位制中为

$$u = \frac{1}{2} \epsilon \dot{v} \dot{v}$$

式中 ϵ 为波动在其中传播的介质的介电常数; $\dot{v}$ 是电场矢量, 我们把 u 的时间平均值写作