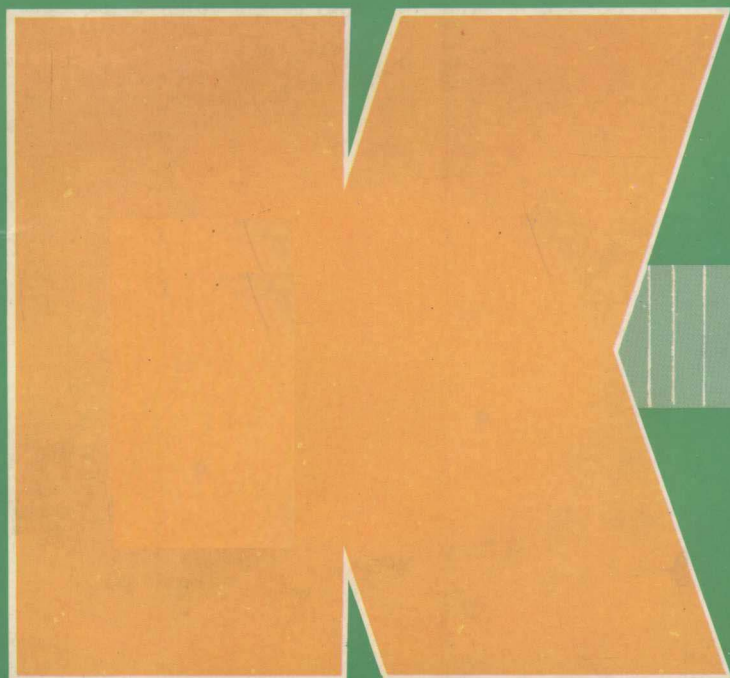




光全息术

于美文 张静方 著



社 社 社 社 社 社
版 版 版 版 版 版
出 出 出 出 出 出
育 育 育 育 育 育
教 教 教 教 教 教
北 京 教 育 出 版 社
河 北 教 育 出 版 社
内 蒙 古 教 育 出 版 社
山 西 教 育 出 版 社
天 津 教 育 出 版 社
联 合 出 版

TB877.1

Y744-2

光全息术

于美文 张静方 著

高科技教育丛书



gaokeji jiao
yu congshu

北京教育出版社

(京)新登字 202 号



图书在版编目(CIP)数据

光全息术/于美文,张静方著.-北京:北京教育出版社,
1994

(高科技教育丛书)

ISBN 7-5303-0608-1

I. 光… II. ①于… ②张… III. 光学-全息方 N.TB8
77.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 06411 号

光全息术

GUANG QUANXI SHU

于美文 张静方 著

*

北京教育出版社出版

(北京北三环中路 6 号)

邮政编码:100011

北京出版社总发行

新华书店北京发行所经销

北京朝阳广益印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 12.875 印张 292000 字

1995 年 2 月第 1 版 1995 年 2 月第 1 次印刷

印数 1—2500

ISBN 7-5303-0608-1
G·582 定 价:12.00 元

作者简介



于美文 女

1922 年

生, 1948 年毕

业于西北大学

物理系。任北

京理工大学工程光学系教授、博士生导师。长期从事物理光学和光全息学科的教学和科研工作。所创建和领导的光学全息实验室在国内全息学研究方面处于领先地位, 在国际上有很好的声誉, 已成为国家教委指定的开放实验室。在国际国内一、二级刊物上共发表论文 70 余篇, 著书两部。



张静方 女

1944 年生,

1966 年毕业于北

京工业学院工程光

学系。博士, 高工。1990-

1991 年赴美高访。申请并

完成两项国家自然科学基金

和多项国防科工委基金

等。在图像假彩色、位相共

轭、全息存储、彩色全息、

全息元件等有创造性成

果, 在国际、国内发表论文

40 余篇, 专著一本。现任

中国人民银行印钞造币总

公司信用卡公司副总工程

师。

前 言

本书是根据《高科技教育》丛书编写要求撰写的。按照循序渐进的教学规律，书中介绍了全息术必要的基础理论、基本知识和方法、以及卓有成效的应用领域，引入了国内外在这一领域中的重要成就。力求理论与实践相结合，数学与物理相结合，是这本书的特色。

光全息术是1948年发现的，是随着激光的问世发展起来的一种新技术。全息术以其能记录和再现物体的真实三维像，已在许多科学技术领域得到广泛的应用。全息三维显示如果用X射线激光记录全息图，用可见激光照明再现，能够研究物质的微观结构和生命的细微过程。白光再现全息术因能在白昼自然环境中或者在普通灯光照明下观察到三维图像，得到迅速发展；目前模压全息图大批量复制技术已形成全息印刷产业，普遍用于科学技术、文化教育、防伪保安、艺术等领域。全息元件以其体薄、量轻的优点除在军事、宇航中有重要的应用外，还可用于光学神经网络、光计算、扫描器、光纤耦合器、光盘读写头等。计算机制全息图可以再现实际不存在的三维物体像，设计制作各种类型的全息图、全息元件、全息滤波器等。全息干涉计量已在无损检测、应力变形、光弹性力学、光学测量等方面有了重要的应用。因此光全息术在高科技中占有了重要的位置。所以本书的出版不仅为培养这一学科领域的高科技人材提供合适的教科书或参考书，也可供有关的科技人员参考，以促

前 言

进这一新技术在高科技发展中发挥作用。

本书中内容分为三部分：第一、二、三章介绍全息学的基础理论、基本知识和全息图制作中的一般问题；第四、五、六、七、八章以白光照明再现全息术为重点，介绍彩虹全息、彩色全息、合成全息和模压全息等；第九章介绍全息术在相关领域中的重要应用。其中第一至第四章和第九章为于美文撰写，第五至第八章由张静方撰写。

由于作者水平所限，书中难免存在错误和不妥之处，望读者提出批评、建议和补充修改意见，以便再版时采纳，使本书进一步完善。

最后感谢生产模压全息设备的北京三友激光图像公司对本书出版工作的支持。

作者

1993.11.25

序

高科技研究及产业的发展对我国实现四个现代化的宏伟事业有重要的战略意义。从1986年开始我国高技术研究发展计划实施以来,极大地促进了诸如生物、信息、自动化、新能源、新材料等一些重要领域在研究开发及产业化方面的进展。然而与国际上迅速发展的局面相比,无论在覆盖的领域、研究开发水平及产业化的进度方面都还存在着程度不同的差距。这一方面有赖于随着国家经济实力的增长而加强在研究开发及成果转化方面的投入。而更重要的是要造就及培养一大批能从事高科技工作的人才。高科技竞争归根到底是人才的竞争,而人才的培养要从教育着手。出于这样的目的,出版“高科技教程与专著”主要是使正在大学就读的大学生、研究生及已经从事相关领域工作的科学技术工作者有更广泛的机会较深入地的一部分与高科技领域有关的基本概念、基础理论及主要应用。这无疑对于我国高科技人才的培养起到促进作用。这套丛书的撰写虽然选材的角度及所涉及的学科的范围不尽相同,然而著者却是在这方面有造诣及有教学研究工作经验的专家。形成一个专集,并作为整个“高科技教育丛书”的一个重要组成部分而出版是一件很有价值的事情。

值得指出的是北京、天津、河北、山西和内蒙古教育出版社为了支持这套专著的出版在资金及人力上都作出了贡献,借此机会要向他们表达谢意。



一九九四年七月十四日

目 录

第一章 全息术的基础知识	(1)
1.1 基本原理	(1)
1.2 全息图的类型.....	(5)
1.3 记录与再现所用的光源.....	(10)
1.4 全息记录介质的特性	(15)
1.5 常用的记录介质	(20)
1.6 全息记录系统	(29)
1.7 暗室设备及操作	(35)
1.8 全息干版的处理	(36)
附录 1 常用显影液配方.....	(41)
附录 2 常用定影液配方.....	(44)
附录 3 常用坚膜液配方.....	(44)
附录 4 常用漂液配方.....	(45)
附录 5 其它配方.....	(47)
参考文献	(47)
第二章 平面全息图	(48)

2 目 录

2.1	菲涅耳全息物的物像关系	(48)
2.2	菲涅耳全息图的几何作图法	(55)
2.3	菲涅耳全息像的像质评价	(57)
2.4	夫琅和斐型全息图	(65)
2.5	傅里叶变换全息图	(67)
2.6	准傅里叶变换全息图	(69)
2.7	透射全息图的其它记录方式	(72)
	参考文献	(81)
第三章	体积全息图	(82)
3.1	体积全息图的几何分析	(82)
3.2	体积全息图的衍射效率	(90)
3.3	反射全息图的记录与再现	(95)
3.4	体积全息图再现像的像质	(103)
3.5	反射式傅里叶变换全息图	(107)
3.6	周视反射全息图记录系统	(111)
	参考文献	(114)
第四章	彩虹全息	(116)
4.1	概述	(116)
4.2	二步彩虹全息	(117)
4.3	彩虹全息的像质	(120)
4.4	一步彩虹全息	(123)
4.5	像散彩虹全息	(124)
4.6	综合狭缝法	(128)
4.7	条形散斑屏法	(130)
4.8	零光程差法	(134)
4.9	几种改进型的记录系统	(136)
	参考文献	(145)

第五章 彩色全息术	(147)
5.1 概述	(147)
5.2 激光再现的彩色全息	(150)
5.3 真彩色彩虹全息	(155)
5.4 消色差全息	(165)
5.5 体积彩色全息	(178)
5.6 假彩色像全息术	(201)
5.7 彩色胶片的图像存储	(202)
5.8 彩色全息像的色度和色彩保真度	(208)
参考文献	(214)
第六章 全息图的模压复制	(216)
6.1 概述	(216)
6.2 浮雕型彩虹全息图的记录	(221)
6.3 模压全息像的颜色设计	(227)
6.4 金属压模的制造	(230)
6.5 全息图的热压复制	(232)
6.6 光致抗蚀剂	(236)
6.7 浮雕全息图和模压全息图的像质	(247)
6.8 三维真彩色模压全息图	(249)
6.9 模压全息现状与展望	(256)
参考文献	(260)
第七章 合成全息——准三维显示	(261)
7.1 概述	(261)
7.2 360° 合成彩虹全息	(263)
7.3 制作 360° 合成彩虹全息的新方法	(282)
7.4 360° 合成彩虹全息在医学中的应用	(289)
7.5 纵向多路合成全息	(294)

4 目 录

(参考文献.....)	(296)
第八章 全息电影.....	(298)
8.1 概述	(298)
8.2 全息影片的记录和再现	(302)
8.3 全息银幕	(313)
8.4 全息术和立体投影屏的结合	(322)
8.5 眼睛对激光的安全防护	(334)
8.6 全息电影的主要优点和进展	(339)
(参考文献.....)	(345)
第九章 其它光全息术.....	(346)
9.1 计算机制全息图	(346)
9.2 全息干涉计量	(353)
9.3 全息显微术	(361)
9.4 全息信息存储	(364)
9.5 全息空间滤波器	(367)
9.6 白光全息术及其应用	(369)
9.7 偏振全息术	(372)
9.8 自参考光全息术	(379)
9.9 光纤全息术	(383)
9.10 全息光学元件.....	(389)
(参考文献.....)	(399)
(185)	全息术三系——全息组合 章子静
(185)	全息术三系——全息组合 章子静
(185)	全息术三系——全息组合 章子静
(185)	全息术三系——全息组合 章子静
(185)	全息术三系——全息组合 章子静
(185)	全息术三系——全息组合 章子静
(185)	全息术三系——全息组合 章子静
(185)	全息术三系——全息组合 章子静
(185)	全息术三系——全息组合 章子静
(185)	全息术三系——全息组合 章子静

第一章

全息术的基础知识

1.1 基本原理

全息术包括记录与再现两个过程。

记录是拍照物体光波和参考光波的干涉图形，该图形经显影处理后称为全息图。记录全息图最好的光源是激光器。因为激光具有很高的空间和时间相干性，光束的发散角小，能量高度集中。记录光路如图1-1所示。自激光器发出的光束经分束器 P 分束以后，一束经 M_1 反射和 L_1 扩束后的发散球面波作为参考光波，并投射在记录介质 H 上。另一束经 M_2 反射和 L_2 扩束后作为物体的照明光波，然后经物体表面的散射和反射也投射在记录介质上，称为物光波。物光波带有物体特征的信息，构成一种复杂的光场，用复振幅表示如下：

$$O(x, y) = O_0(x, y) \exp[j\varphi_0(x, y)] \quad (1.1)$$

式中 (x, y) 是记录介质上一点的坐标。

类似的参考光波用下式表示，

$$R(x, y) = R_0(x, y) \exp[j\varphi_R(x, y)] \quad (1.2)$$

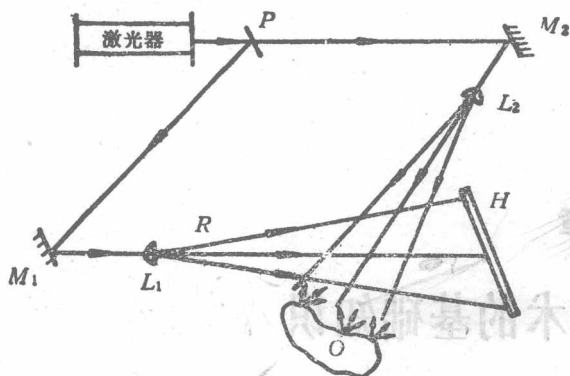


图1-1 全息图的记录光路

因为参考光波一般是简单的平面波或球面波，其位相项 $\varphi_R(x, y)$ 可用下述公式表示：

$$\varphi_R = k_0 x \sin \theta \quad (\text{平面波}) \quad (1.3)$$

$$\varphi_R = k_0 \left(-\frac{x^2 + y^2}{2l_R} + x \sin \theta \right) \quad (\text{球面波}) \quad (1.4)$$

式中 $k_0 = \lambda_0 / 2\pi$ ， λ_0 是记录用的波长； l_R 是参考光源与记录介质上坐标原点的距离； θ 是在原点处参考光束与记录介质法线之间的夹角。

全息记录介质有很多种，最常用的超微粒银盐干版（一般称为全息干版）。本文在不特别说明时，所用记录介质均指全息干版。

由于物光波和参考光波相叠加，全息干版上的光强分布为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |O + R|^2 = OO^* + RR^* + OR^* + O^*R \\ &= (O_0^2 + R_0^2) + OR^* + O^*R \\ &= (O_0^2 + R_0^2) + O_0 R_0 \exp[j(\varphi_O - \varphi_R)] \\ &\quad + O_0 R_0 \exp[-j(\varphi_O - \varphi_R)] \end{aligned}$$

$$= (O_0^2 + R_0^2) + 2O_0R_0\cos(\varphi_0 - \varphi_R) \quad (1.5)$$

最后的等式表明，干涉以后的光强分布按余弦规律变化。

全息干板经过曝光和标准的显影处理以后，即是一张全息图，也可以称为全息照片。这种全息图因为记录时物光波和参考光波都从干板的一侧入射，称为透射全息图。透射全息图的特性可用振幅透射系数 $T_H(x, y)$ 表示，它在线性记录条件下为

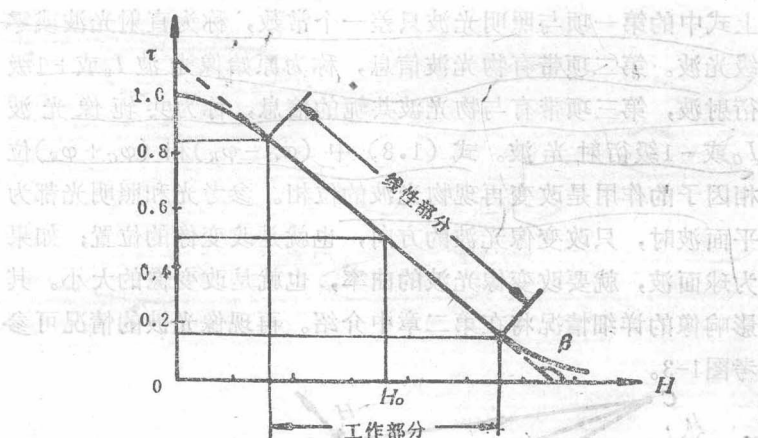


图1-2 全息干板的 τ - H 曲线

$$T_H(x, y) = \tau_0 + \beta [O_0^2 + R_0^2 + 2O_0R_0\cos(\varphi_0 - \varphi_R)] \quad (1.6)$$

式中 β 是全息干板 τ - H 曲线线性部分的斜率，参考图1-2。对于正片 $\beta > 0$ ，负片 $\beta < 0$ 。图1-2是负片的 τ - H 曲线， H 表示曝光量，它等于曝光强度 I 与曝光时间 t 的乘积，即

$$H = It$$

再现过程一般是用与参考光波相似的光波（称为再现照明

4 光全息术

光波) 照射全息图, 该光波用下式表示:

$$C(x, y) = C_0(x, y) \exp[j\varphi_C(x, y)] \quad (1.7)$$

再现光波如图1-3所示, 并可用下述公式表示:

$$\begin{aligned} W(x, y) = & C r_H = C [\tau_0 + \beta(O_0^2 + R_0^2)] \\ & + \beta C O R^* + \beta C O^* R \\ = & C_0 \exp(j\varphi_0) [\tau_0 + \beta(O_0^2 + R_0^2)] \\ & + \beta C_0 R_0 O \exp[j(\varphi_C - \varphi_R)] \\ & + \beta C_0 R_0 O^* \exp[j(\varphi_C + \varphi_R)] \end{aligned} \quad (1.8)$$

上式中的第一项与照明光波只差一个常数, 称为直射光波或零级光波。第二项带有物光波信息, 称为原始像光波 I_0 或 +1 级衍射波, 第三项带有与物光波共轭的信息, 称为共轭像光波 I_c 或 -1 级衍射光波。式 (1.8) 中 $(\varphi_C - \varphi_R)$ 和 $(\varphi_C + \varphi_R)$ 位相因子的作用是改变再现物光波的位相。参考光和照明光都为平面波时, 只改变像光波的方向, 也就是改变像的位置; 如果为球面波, 就要改变像光波的曲率, 也就是改变像的大小。其影响像的详细情况将在第二章中介绍。再现像光波的情况可参

考图1-3。

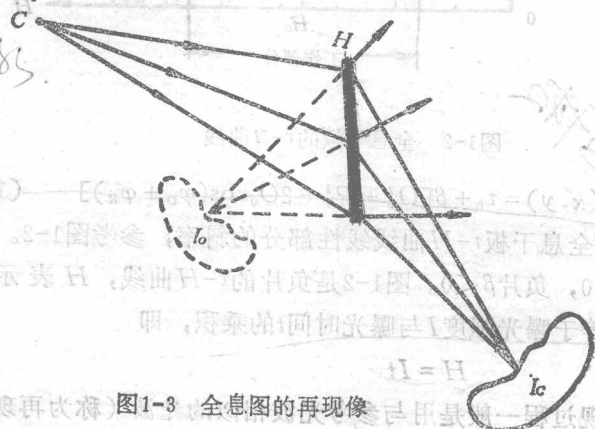


图1-3 全息图的再现像

应当指出, 式 (1.8) 表明在线性记录条件下的透射全息图只有零级和 ± 1 级波衍射。这是理想的薄记录介质的情况。所谓理想记录介质是指在全息图中无散射光存在; 薄乃指记录介质的厚度小于条纹间距。对于实际的透射全息图, 我们将会看到一些更为复杂的现象, 这将在第二章中加以说明。

1.2 全息图的类型

全息图的类型可以从不同的观点来分类, 现根据其 main 特征加以说明。

1.2.1 按制作全息图的方法分类

目前制作全息图的方法有两种: 光学记录全息图和计算机制作全息图。光学记录全息图采用在感光材料上记录参、物光波干涉条纹的方法。计算机制作全息图是先用计算机算出在全息图上抽样点的参考光和物光叠加以后的复振幅, 然后采用一种编码技术, 用计算机绘图仪绘制放大的全息图, 再用精密相机缩小到应有的尺寸。这种全息图在制作时较为复杂, 但可以制作实际不存在的物体的全息图, 通过再现方式显示出设想的物体来。例如用计算机设计制作一种建筑物的全息图, 再现出该建筑物的三维像。

关于全息图的制作, 除上述两种方法外, 近期还发展有电子束蚀刻、离子束蚀刻和计算机控制激光束直接曝光, 以及模压复制等方法。

1.2.2 按全息图复振幅透射系数 (或反射系数) 分类

如果式 (1.6) 所示的振幅透射系数是一个实数量, 则它表示的全息图称为振幅全息图。但它一般是复数量, 用下式表示:

$$T_H(x, y) = \tau_H(x, y) \exp[j\phi_H(x, y)] \quad (1.9)$$

称为复振幅透射系数, 式中 ϕ_H 表示位相的改变。若全息图的复振幅透射系数中 τ_H 与 (x, y) 无关, 即可忽略此常数因子, 该全息图称为位相全息图。这样位相全息图的复振幅透射系数成为一纯指数函数

$$\tau_H(x, y) = \exp[j\phi_H(x, y)] \quad (1.10)$$

透射系数为式(1.9)所示的全息图, 称为混合型全息图。它兼有振幅和位相全息图的性质。

实际的记录材料有振幅型、位相型和混合型三种。位相型记录材料又分为浮雕型和折射率型。如果记录介质在曝光和处理以后厚度改变, 折射率不变, 它被称为浮雕型的; 相反, 若记录材料的厚度不变, 折射率改变, 则称为折射率型的。

用全息干板制作的全息图, 在显影处理以后是振幅全息图, 经过漂白处理以后便成为位相全息图或混合型的全息图。

1.2.3 按全息图的结构分类

全息图中干涉条纹的结构与参考光波的方向和波形密切相关。以平面光波为例, 如图1-4所示, 物光波和参考光波自记录介质的一侧入射, 这样记录的全息图称为透射全息图, 此时

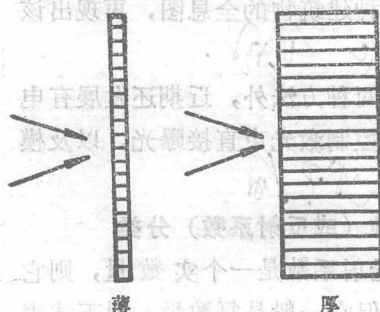


图1-4 透射全息图的结构

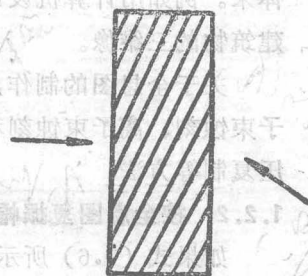


图1-5 反射全息图的结构

记录介质中的条纹面接近垂直于表面。物光波和参考光波自两