

H. M. 史密斯 编

全息记录 材料

科学出版社

内 容 简 介

本书较全面地介绍了各种全息记录材料。内容包括基本全息理论、卤化银照相材料、重铬酸盐明胶、铁电晶体、无机光色材料、热塑材料、光致抗蚀剂等材料的特性、主要工艺及器件结构。

本书适合光学全息技术、光学信息存储、信息处理、光化学、全息记录材料等科研及工程技术人员参考,亦可供高等院校光学、光化学、应用光学等专业的师生阅读。

H. M. Smith

HOLOGRAPHIC RECORDING MATERIALS

Springer-Verlag 1977

全 息 记 录 材 料

H. M. 史密斯 编

马春荣 郑桂泉 王诚华 译

责任编辑 刘海龄

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

*

1984 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1984 年 7 月第一次印刷 印张: 10 3/8

印数: 0001—4,400 字数: 231,000

统一书号: 15031·583

本社书号: 3605·15—4

定价: 1.60 元

译 者 的 话

激光问世不久,全息技术重新崛起. 光学全息及信息处理发展得非常迅速,而应用范围也日益增多.

记录材料是全息技术中不可分割的一部分. 目前国内外对此领域已进行了大量的研究,而且全息技术的科学理论和工艺技术为记录材料的应用做了大量的准备工作. 可以说能否实现某种用途,关键在于能否获得合适的记录材料.

目前,国内尚无关于全息记录材料的专著,国外有关此内容的书籍也是屈指可数. 此书对有关基本理论、材料特性、主要工艺、器件结构等介绍的较全面. 但由于是八个人执笔,部分内容略有重复,使用符号及术语不完全一致.

本书内容属边缘学科,由于我们水平所限,译文中难免有不妥之处,请读者批评指正.

在翻译此书的过程中,得到于美文老师多方指教,张志远同志作了大量的文字校对工作,在此表示衷心的感谢.

前 言

随着大量崭新的和日臻完善的工艺技术的发展,在揭示并初步研究了其基本原理之后,随之而来的便是全力寻求材料的时期.在这个时期,人们探索各种可能的应用,并着手进行工程和设计.晶体管和激光器这两项近代的发现就是这种工艺技术发展的主要例证.第三个实例是全息术的发明和最近的兴起.此后,1962至1964年间出现了长期(并且的确在进行)寻找理想的记录材料.本书旨在介绍有关材料方面的一些最新研究成果.

我们之所以现在来编写一本记录材料的书,不仅是因为人们已经对记录材料进行了大量的研究,而且还因为全息照相的科学理论和工艺技术为记录材料的应用做了大量的“准备工作”.既然已经明确了要求、目的和有效应用范围,全息照相可应用的广度也就收缩到这样的程度,即不管怎样,某一特定应用是否可行,完全取决于能否获得合适的记录材料.由于上述种种原因,而且也由于在大多数情况下,各种全息应用都对记录材料有其独特的要求,所以迫切需要一本论述记录材料的书.

本书正是为满足这一需要而编写的.第一章概括地叙述了全息术的基本理论和原理,其目的是使读者熟悉基本的理论和术语,因而以后的章节则可以完全用来叙述记录材料.编者力求包括各种众所周知的全息(或激光)记录材料.各章的作者也都做到了使每章阐述的内容都能反映出当前的技术发展水平,其中有些材料还是首次在本书中提到.

本书力图成为一本专著，但由于撰稿人很多，因此，尽管编者作了很大努力，还难免会出现一些内容上的重复和使用符号上的不一致。因此，谨表歉意。但愿这些问题影响不大，而不致损害每章的内容。

H. M. Smith

1977 年 6 月于纽约州

罗契斯特城

目 录

第一章 全息基本原理.....	1
1.1 历史	1
1.2 基本叙述	2
1.3 分类	3
1.4 衍射效率	7
1.4.1 平面全息图	8
振幅全息图	8
位相全息图	11
1.4.2 体积全息图	13
耦合波理论	13
透射全息图	16
反射全息图	20
结语	22
1.5 噪声	23
参考文献	25
第二章 卤化银照相材料.....	26
2.1 全息过程	27
2.2 卤化银乳剂	28
2.3 制作全息图和空间滤波器的实际程序	31
2.3.1 市售照相材料	31
2.3.2 记录全息图	33
关于记录材料、规格和几何形状概况	33
关于减反射处理的偏差问题	33
关于进一步挑选记录材料及其规格和几何形状问 题.....	34
强度比 K 和曝光量	35

2.3.3	处理过程	36
	标准程序	36
	专用显影剂	40
2.3.4	波前再现	41
2.3.5	原位显影实时干涉仪	42
2.4	薄振幅全息图的特性参数及其评价	44
2.4.1	二阶传递过程	44
2.4.2	宏观特性	46
2.4.3	微观特性	47
	调制传递函数 (MTF)	47
	相干光的 MTF	48
	在高空间频率测定 MTF 的方法	49
	测微光密度计	50
	衍射方法	51
	多正弦狭缝测微光度计	54
	卤化银材料的调制传递数据	56
2.4.4	散射光通量谱	58
2.4.5	品质因数和改进照相材料的尝试	63
	全息曝光量指数	63
	增加全息曝光指数的途径	63
	灵敏度扩展到红外辐射	64
2.5	效应	66
2.5.1	宏观非线性传递	66
2.5.2	微观非线性传递	69
2.5.3	复合光栅的形成	72
2.5.4	“乳剂应力”	73
2.6	薄振幅全息图的衍射效率和信号-背景比的实验数据	74
2.7	位相全息图	77
2.7.1	产生位相光栅的原理	77
2.7.2	漂白程序	79

明胶浮雕的形成	80
漂白	81
气体漂白	82
反转处理方法	83
2.7.3 关于衍射效率和信号-背景比的实验数据	84
2.8 厚全息图	85
2.8.1 厚照相乳剂的特性	86
2.8.2 适用的材料,存在的问题	87
2.8.3 扩展厚度的全息图	88
2.8.4 厚全息图的衍射效率和信号-背景比的实验数据	89
2.9 结束语	92
参考文献	91
第三章 重铬酸盐明胶	96
3.1 光化学基础	97
3.1.1 重铬酸盐胶层	97
3.1.2 明胶的性能	98
3.1.3 重铬酸盐离子的光敏性	100
3.2 重铬酸盐明胶作为光敏介质	101
3.2.1 重铬酸盐明胶作为光致抗蚀剂	101
3.2.2 预硬重铬酸盐明胶层的光化学	103
3.2.3 相移增强的 Shankoff 技术	105
3.2.4 处理时乳剂厚度的变化	108
3.3 供厚全息图用的硬重铬酸盐明胶干板的制备和工艺	111
3.3.1 明胶干板的制备	111
3.3.2 显影工序	114
3.3.3 重铬酸盐明胶全息图的稳定性	116
3.4 硬重铬酸盐明胶全息照相的特性	117
3.4.1 可达到的相移	117
3.4.2 感光度	119
3.4.3 分辨率	122

3.4.4 成象质量和噪声	122
3.4.5 存储容量	123
3.5 应用	124
3.5.1 全息光学元件	124
3.5.2 用重铬酸盐明胶复制全息图	125
参考文献	126
第四章 铁电晶体	127
4.1 机理	128
4.1.1 存储	129
4.1.2 消除	136
4.1.3 定影	138
4.1.4 电增强	144
4.2 材料和制备	145
4.2.1 铌酸锂 (LiNbO_3)	145
4.2.2 铌酸锶钡 (SBN)	149
4.2.3 钛酸钡 (BaTiO_3)	149
4.2.4 铌酸钡钠	150
4.2.5 钽酸锂 (LiTaO_3)	150
4.2.6 铌酸钾钽 (KTN)	150
4.2.7 PLZT 陶瓷	151
4.3 使用方法	151
4.3.1 读出/记录系统	152
4.3.2 无损读出 (NDRO) 的读出/记录	152
4.3.3 只有读出的装置	153
4.3.4 多光子吸收	154
4.3.5 分层存储	155
4.3.6 全息页面综合技术	156
4.4 全息特性	156
4.4.1 感光度	156
4.4.2 动态范围	160
4.4.3 分辨率	162

4.4.4 存储时间	163
4.4.5 噪声和畸变	163
参考文献	167
第五章 无机光色材料	169
5.1 基本模型	170
5.2 光色材料 CaF_2 , SrTiO_3 和 CaTiO_3	172
5.2.1 最佳掺杂物和浓度	172
5.2.2 光色吸收光谱	173
5.2.3 光记录型式	177
5.2.4 波长为 514.5nm 的光学读出	178
厚度效应	179
反差比	179
5.2.5 波长为 514.5nm 时的消除型感光度	180
5.2.6 感光测定特性曲线和时间-强度互易性	186
CaF_2 : La, Na 和 CaF_2 : Ce, Na	186
SrTiO_3 : Ni, Mo, Al 和 CaTiO_3 : Ni, Mo	190
5.3 全息图存储	193
5.3.1 感光度	194
5.3.2 最大效率	196
5.3.3 存储容量	197
5.4 光二向色材料	199
5.4.1 模型	199
5.4.2 全息图存储	202
参考文献	205
第六章 热塑全息记录	207
6.1 过程的描述	208
6.1.1 热塑电子束记录	208
6.1.2 感光记录	210
光塑器件	210
外层涂有热塑材料的光导器件	213

器件和过程的改变	216
6.1.3 过程模型和理论	217
无规形变理论	219
6.1.4 材料	220
基片和导电涂层	221
光导体	222
特殊光导体	227
热塑材料	229
6.1.5 制造技术	234
基片和导电涂层	234
光导体的制造	236
热塑涂层的制造	238
外敷层涂布和矩阵化	239
6.2 全息性能	240
6.2.1 带宽和分辨率	240
6.2.2 感光度和衍射效率	247
衍射效率的研究	248
曝光响应的实验结果	251
6.2.3 噪声	255
噪声的实验测量	257
6.2.4 循环操作	260
6.2.5 其他物理特性	261
保存期	262
潜影寿命	262
贮存寿命	263
机械寿命和污染	264
6.3 结论	265
参考文献	267
第七章 光致抗蚀剂	269
7.1 光致抗蚀剂的类型	270
7.2 机理	270

• x •

7.3 全息图的非线性	274
7.4 衍射效率和信-噪比	276
7.5 Shipley AZ-1350 光致抗蚀剂的特性	279
7.5.1 Shipley AZ-1350 材料非线性的研究	280
7.5.2 Shipley AZ-1350 的分辨能力	283
7.5.3 Shipley AZ-1350 浮雕位相全息图的设计程序 ...	284
参考文献	291
第八章 其他全息记录材料和器件.....	292
8.1 磁光薄膜	293
8.2 金属薄膜	294
8.3 光导体记录层状器件	296
8.3.1 铁电-光导体器件	296
8.3.2 液晶光导体器件	300
8.3.3 光导体 Pockel 效应器件	301
8.3.4 弹性材料器件	302
8.3.5 光导器件的优点和局限性	303
8.4 硫族化物玻璃	304
8.4.1 显示无定形结晶相变的材料	305
8.4.2 As_2S_3 及其相关的材料	306
8.4.3 光扩散器件	307
8.4.4 结束语	308
参考文献	309
附加参考文献.....	312
索引.....	314

第一章 全息基本原理

随着大量新的或先进技术的发展，紧跟着基本原理的揭示并进行初步研究阶段之后，将是精心探索材料的时期。晶体管和激光器的新近出现，就是这类技术进展的两个主要例子，而第三个实例则是全息术的发明及其最近得到的新生。在经历了 1962—1964 年期间的复苏以后，对理想记录材料进行长期性的(脚踏实地)探索的时期已经到来。本专题的目的就是介绍这方面研究的一些成果。

1.1 历史

全息术的历史，是从 1948 年 Gabor^[1.1] 发明全息术开始的。他的概念及论证构成了现代全息术的基础。除了其他理由之外，由于使用了一种不适合的光源，严格地限制了所进行的工作。纵然全息术基本上描述一种不同的成象方法，但是几乎没有找到实际应用。

可是，在 1962—1964 年期间，Leith 和 Upatnieks^[1.2,1.3] 发表了一系列叙述全息方法的文章，描述解决早期的全息技术有关的两个比较重要的问题的方法——光源有限的相干性及强度，和在读出过程中深感疑难的信号光波(即成象光波)与照明光波的混合问题。这些文章产生了巨大的启发作用，使整个全息学领域获得了一次新生。相干性问题，是由于激光的发明而解决了。激光用作全息光源能够顾及大面积、三维物体的漫射照明，以及能够不通过任何辅助设备用眼睛观察

具有视差和景深效应的全息再现过程。激光的应用使得在选择全息照相物体和记录装置的物理布局方面有了更大的自由度和适应性——这种自由度是早在二十世纪五十年代的工作者^[1.4-1.11]所梦寐以求的。

第二个问题，是信号光波与照明光波的混合问题。Leith 和 Upatnieks 通过使用离轴（非同轴的）参考光束进行全息记录，而解决了这个问题。反过来，也就要考虑使用一个类似的离轴照明光束以进行全息再现。因为这个照明光波实质上是在不同的方向上传播的，所以它就不再能使成象光波变模糊了。依靠如此简单的技术，他们就可以解决一个对于早期形式的全息术来说较为重要的问题。

在俄国的 Denisjuk^[1.12]和在美国的 Van Heerden^[1.13] 大约在同一时期发展了 1948 年建立的全息基本概念。其中包括能够由白光的反射进行再现的光波的记录问题，和能够将光波记录在记录材料的整个宽广体积中（即体积全息图——译注）的问题。

由于所有上面提到的这些创新的结果，给全息术的旧概念带来了新的生命。不仅全息术的实用性被充分地显现出来，而且其所能产生的引人注目的三维图象引起了全世界数以千计的研究者和科学家的想象力。约在 1964—1970 年这段时间内，人们在全息学领域内所作大量的工作，导致许多新应用思想的出现，从而越来越多地对记录材料提出需求，而这些需求至今业已大部分得到满足。

1.2 基本叙述

如果 O 表示一个来自物体的单色光波， R 是一个和 O 相干的参考光波，则在记录介质上的总光场为 $O + R$ 。因此将

使具有平方律的记录介质反应出光的辐照度 $|O + R|^2$ 。在经过处理之后，此全息记录材料就具有确定的复数振幅透射率 $T_a(x)$ ，它可表示为曝光量 $E(x) = t|O + R|^2$ 的函数 (t 为曝光时间)：

$$\begin{aligned} T_a(x) &= \beta E(x) = \beta t |O + R|^2 \\ &= \beta t (|O|^2 + |R|^2 + OR^* + O^*R) \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中 $*$ 表示共轭复数，而 β 取决于所用的记录材料。当具有此振幅透射率的全息图被光波 C 照明时，于是在全息图上的透射光波应为：

$$\begin{aligned} \phi(x) &= CT_a(x) \\ &= \beta t (C|O|^2 + C|R|^2 + CR^*O + CRO^*) \end{aligned} \quad (1.2)$$

假定照明光波 C 是足够均匀的，以致于在全息图的整个截面上 CR^* 近似为常数。那么，方程 (1.2) 的第三项将简化为“常数乘 O ”。因此，这一项就表示一个和原始的物光波 O 完全相同的再现光波。其余各项所表示的是零级波 $\beta Ct(|O|^2 + |R|^2)$ 和另一个一级波 $\beta CtRO^*$ 。后者即是通称的所谓“共轭”波。这些项所代表的光波，就是产生上面提及的那些对于早期的 Gabor 全息图说来是成为困惑问题的波。但是，由于跟这类全息图有关的参考光束被偏置，这些光波便同所要求的再现光波从空间上分离开来。而这就是离轴技术的主要优点，也是 1964 年又重新引起人们对全息感兴趣的主要原因。

1.3 分 类

全息图分类的依据为：记录全息图所采用的几何配置的方式；强加在照明光波上的调制的类型；记录材料的厚度和成

象的方法。

如果两列相干波束,实质上是在同一方向上传播的,则所记录到的干涉图表明是 Gabor 全息图,或称同轴全息图;如果两列相干波束,实质上是从不同的方向到达记录介质的,则所记录到的干涉图是 Leith-Upatnieks 全息图,或称离轴全息图;如果此两列干涉波束,实质上是在相反的方向上传播的,则所记录到的全息图表明是李普曼全息图,或称反射全息图。

若再根据记录的方式进一步细分,则上述这些全息图又可分为 Fresnel 全息图、Fourier 变换全息图或 Fraunhofer 全息图、和无透镜 Fourier 变换全息图*。一般说来,如果物体适当地靠近记录介质——譬如说大约为全息图或物体的 10 倍的距离,则全息图平面上的光场,就是该物体的 Fresnel 衍射图,因而被记录的全息图就是 Fresnel 全息图;另一方面,如果物体和记录介质相距为全息图或物体的很多倍,则在记录平面上的光场就是该物体的 Fraunhofer (或远场)衍射图,并且 Fraunhofer 全息图也因而得名。如果在记录平面上产生远场衍射图利用的是透镜,而且此透镜到物体和到记录平面的距离都和它的焦距相等,结果就得到 Fourier 变换全息图(被提供的参考波必须是平面波);最后,如果参考光束的起点和物体光束的起点距离记录平面两者相等时,则产生所谓无透镜 Fourier 变换全息图。

上述各类全息图中的任何一种,同样也可被记录成厚全息图或薄全息图。薄全息图(亦称平面全息图)是这样一种全息图,它的记录介质的厚度比所记录到的条纹间隔要小;厚全息图(亦称体积全息图)是这样一种全息图,其记录介质的厚

* 考虑到 Fourier 变换全息图和 Fraunhofer 全息图同为远场衍射这一共性,而不是如原文那种提法,故在这段文字的译述中,已略加改正过。
——译者注

度等于或大于此条纹间隔。通常，借助于 Q 参量来区分体积全息图和平面全息图。 Q 参量可被定义为：

$$Q \equiv 2\pi\lambda d / (n\Lambda^2) \quad (1.3)$$

式中， λ ——照明光波的波长；

n ——记录材料的折射率；

d ——记录材料的厚度；

Λ ——被记录到的条纹的间隔。

尽管最近已经证明^[1,14]，甚至对于 Q 值为“1”这种数量级时，体积全息图的理论（即耦合波理论）也是完全正确的，但我们依然把 $Q \geq 10$ 的全息图看作体积全息图，而把其余情况下的全息图看作平面全息图。

最后，全息图也可根据再现照明波的衍射机理进行分类。在振幅型全息图中，干涉图记录到的是记录介质发生的密度变化，而当再现时，照明光波的振幅就被进行了相应的调制；但在位相型全息图中，被加在再现照明波上的是相位调制。

全息图的振幅透射率是一个复变量函数，它描述再现照明波在通过记录材料传播时的振幅和相位的变化。如果照明光场用复变量函数 $C(x) = C_0(x) \exp[i\varphi_0(x)]$ 来描述，且透射光场用函数 $\phi(x) = b_t(x) \exp[i\varphi_t(x)]$ 来描述，那么，全息图的振幅透射率被定义为此两量之比：

$$T_a(x) = \frac{\phi(x)}{C(x)} = \left[\frac{b_t}{C_0} \right] e^{i(\varphi_t - \varphi_0)} \quad (1.4)$$

在大多数情况下，照明光波“ C ”为常量或近似于常量，因此复值振幅透射率可由下式给出

$$T_a(x) = b_t(x) \cdot e^{i\varphi_t(x)*} \quad (1.5)$$

由式(1.5)可以看出，如果 $b_t(x)$ 为变量，但 $\varphi_t(x)$ 为常量，则

* 在将 $C(x)$ 归一化之后，式(1.4)便可写作 $T_a(x) = \phi(x)$ ，因此，原文此处的 φ_0 显系 φ_t 之误，故在译述时已作了改正。——译者注