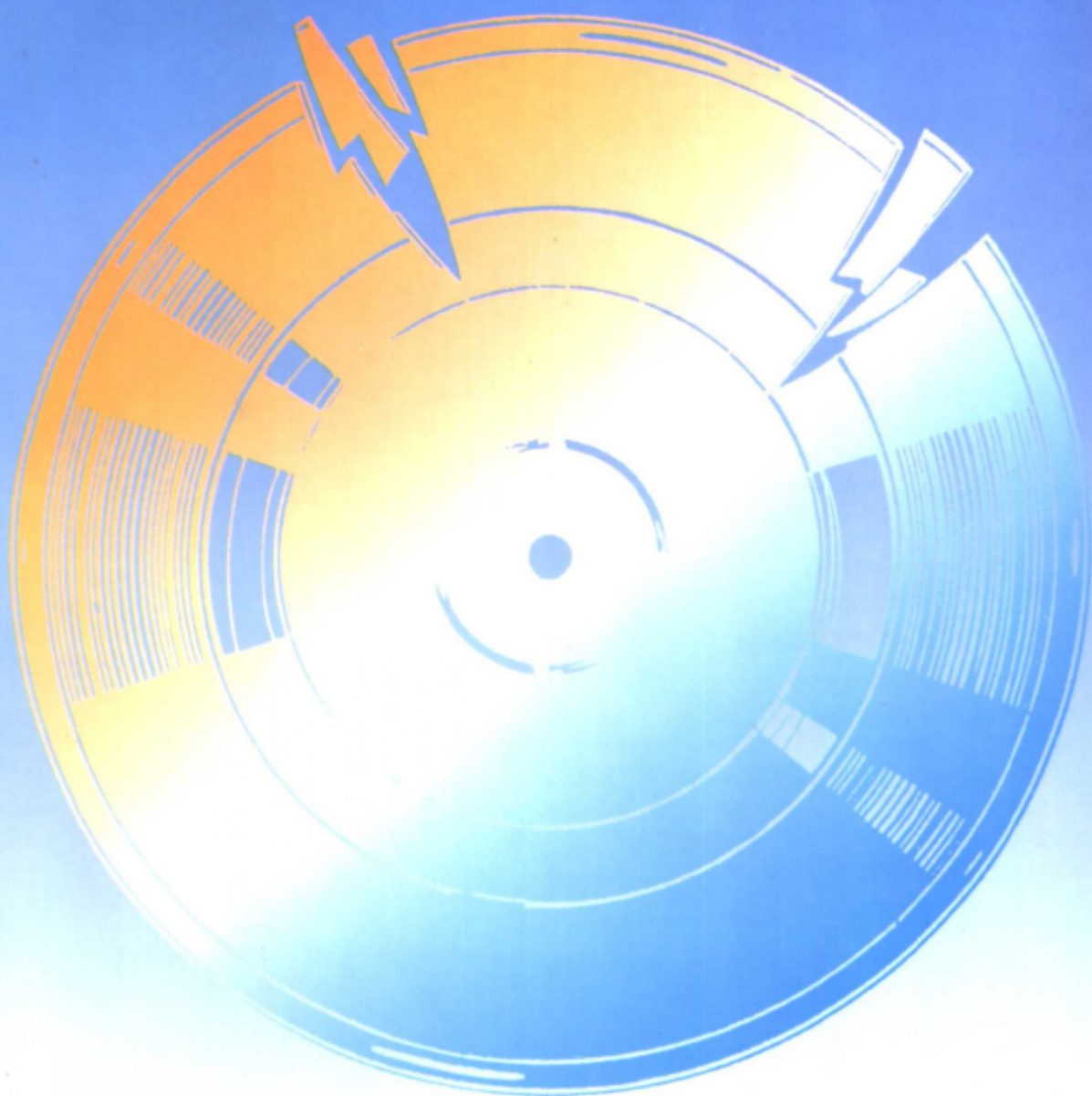


全息记录材料 及其应用

于美文 张存林 杨永源 著



高等教育出版社



数据加载失败，请稍后重试！

全息记录材料及其应用

于美文 张存林 杨永源 著

高等教育出版社

(京)112 号

内 容 简 介

本书首先简要介绍了全息学基础理论和基本知识,然后在此基础上介绍了七种类型常用的和三种较有应用前景,但尚在探索中的全息记录材料的制备、成像机理、全息记录特性及测试、发展情况和应用。

本书的特点是很好地反映了近代全息技术发展的成就。第一,系统地介绍了各种全息记录材料的性能、机理、特点和应用,从卤化银、明胶、光导热塑、光聚合物、光致抗蚀剂一直到光致各向异性、光折变和液晶等材料,对新型的光聚合物材料讲得特别详细。第二,在注意介绍理论和机理的同时,特别注意应用以加强实用性,如对卤化银材料,系统地介绍了国内外当代常用的各种型号干版或软片的不同性能及处理方法,这些内容对全息工作者非常有用。第三,充分考虑到全息术应用和发展的主要因素是全息记录材料,因而较详细地介绍一些正在研究中有应用前景的记录材料,如光致各向异性、光折变晶体、液晶等更新的记录材料。

本书可作为高等学校应用物理学专业和光学仪器专业及相关专业的研究生教材和本科生选修课教材,亦可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

全息记录材料及其应用/于美文等著. —北京:高等教育出版社,1997
ISBN 7-04-005549-X

I. 全… II. 于… III. 全息照相存储—磁光存储材料 IV. ①TM271 ②TP333.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 00468 号

*

高等教育出版社出版
北京沙滩后街 55 号
邮政编码:100009 传真:64014048 电话:64054588
新华书店总店北京发行所发行
北京印刷三厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 19 字数 460 000
1997 年 7 月第 1 版 1997 年 7 月第 1 次印刷
印数 0001—1 214
定价 25.80 元

凡购买高等教育出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页等
质量问题者,请与当地图书销售部门联系调换

版权所有,不得翻印

前 言

本书按照循序渐进的教学规律,在介绍全息学基础理论、基本知识和对全息记录材料特性要求的基础上,介绍了主要全息记录材料的制备、成像机理、全息记录特性及应用,并反映了国内外学者近期在这一学科领域教学与科研工作中所作出的贡献和实际经验体会。力求内容新颖,概念清楚,联系实际,加强实用性,使其具有一定的特色和风格。

全息术发展到今天,阻碍全息术推广应用和发展的主要因素是记录材料。有许多应用方案在通过了原理实验以后,达不到实际应用的要求,往往是因为受到记录材料的限制。目前国内外正在致力于改善已有记录材料的性能和开展新型记录材料的研究。全息记录材料属于光学与光化学交叉学科,要深入这一领域的研究工作,需要有一个适应阶段,因此,本书在取材方面考虑了制作和使用记录材料双方的需要。希望本书的出版不仅为培养这一交叉学科领域专门人材提供合适的教材或教学参考书,也为使用和研制全息记录材料的技术人员提供了一部有价值的参考书。

全书共九章,除第1章介绍全息学基础知识外,其它八章专门介绍七种类型常用的和三种较有应用前景但尚在探索中的全息记录材料。本书由北京理工大学于美文、张存林和中国科学院感光化学所杨永源合著。

本书也是作者合作完成国家自然科学基金资助课题研究工作的一部分。

本书由北京邮电大学徐大雄教授主审。

北京理工大学王殿福教授,华北光学仪器厂盛尔镇教授级高工和中国科学院感光化所杨卫东老师对部分章节提出了宝贵的意见。山西大学安守忠教授,天津市缩微公司袁维本教授级高工,天津感光材料公司章爱芬、卜钦安、张洪奎高工,中国科学院物理所王树铎先生以及全息专家 Stephen A. Benton、Richard D. Rallison 等和 Agfa、Ilford 公司提供了某些资料,在此表示衷心感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在错误和不妥之处,恳切希望读者提出批评建议和补充修改意见,以便再版时能够使本书更趋于完善。

作者

1994.04.25

目 录

前言	1	§ 4-5 光导热塑片的特性及应用	124
第一章 光全息学基础	1	参考文献	124
§ 1-1 光全息学原理	1	第五章 光致聚合物	125
§ 1-2 全息图的类型	3	§ 5-1 光聚合及光聚合动力学	125
§ 1-3 薄全息图的衍射效率	8	§ 5-2 光聚合型全息记录材料的基本组成	129
§ 1-4 厚全息图耦合波理论的衍射效率	9	§ 5-3 单体	150
§ 1-5 厚全息图分层介质理论的衍射效率	18	§ 5-4 成膜树脂	154
§ 1-6 多次曝光全息图衍射效率	18	§ 5-5 美国杜邦公司的光聚合型全息记录材料	156
§ 1-7 全息术中常用物理量及术语	19	§ 5-6 美国波拉公司的光聚合型全息记录材料	165
参考文献	24	§ 5-7 其它类型光聚合型全息记录材料	170
第二章 卤化银记录材料	25	§ 5-8 双光子光聚合型全息记录材料	176
§ 2-1 卤化银乳胶的制备和成像机理	25	§ 5-9 液相光聚合型全息记录材料	178
§ 2-2 卤化银乳胶的性能	29	§ 5-10 光致聚合物全息记录材料特性	181
§ 2-3 市售全息干版及软片介绍	36	参考文献	182
§ 2-4 银盐全息图的记录与处理	47	第六章 光致抗蚀剂	185
§ 2-5 银盐全息图的漂白处理	59	§ 6-1 光分解型	185
附录 卤化银乳胶处理用药品简介	64	§ 6-2 光交联型	194
参考文献	68	§ 6-3 光聚合型	200
第三章 重铬酸盐明胶	69	§ 6-4 浮雕型全息母版的制作	204
§ 3-1 光化学基础	69	§ 6-5 常用光致抗蚀剂特性及处理工艺	210
§ 3-2 重铬酸盐明胶(DCG)作为光敏介质	76	参考文献	223
§ 3-3 供厚全息图用的硬重铬酸盐明胶干版制备和工艺规范	82	第七章 光致各向异性材料	224
§ 3-4 改进型 DCG 干版全息图制作举例	86	§ 7-1 偏振光的琼斯矢量	224
§ 3-5 影响 DCG 全息图特性的主要因素	93	§ 7-2 光致各向异性晶片的特性矩阵	226
§ 3-6 重铬酸盐明胶特性及其应用	110	§ 7-3 偏振全息图的曝光特性与透射矩阵	227
参考文献	111	§ 7-4 氯化银乳胶光致各向异性材料及其应用	231
第四章 光导热塑料	113	§ 7-5 光致二向色性晶体	238
§ 4-1 光导热塑全息记录顺序法、同时法原理	113	§ 7-6 光致各向异性有机材料	240
§ 4-2 光导热塑材料及制备	114	参考文献	247
§ 4-3 影响记录质量的几个因素	119		
§ 4-4 改进型光导热塑材料	122		

第八章 光折变晶体	248
§ 8-1 光折变晶体的成像机制	249
§ 8-2 电光效应与电光系数	252
§ 8-3 光折变晶体的全息特性	259
§ 8-4 光折变晶体材料	262
§ 8-5 光折变晶体应用举例	271

参考文献	274
第九章 其它全息记录材料	276
§ 9-1 液晶	276
§ 9-2 电光陶瓷	289
§ 9-3 硫族化合物	290
参考文献	295

第一章 光全息学基础

对全息记录材料性能的要求与全息图的类型密切相关,为更好地制作和正确使用记录材料,本章首先介绍全息学的基本原理、全息图的类型、全息图的衍射效率和全息记录材料的特性。

§ 1-1 光全息学原理

光全息术包括记录与再现两个过程。记录是用全息干版或其它全息记录介质拍摄物体光波和参考光波的干涉图形,经曝光、显影处理后形成底片,该底片称为全息图。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。一般的全息记录系统如图 1-1(a)所示,激光器输出的光束经分光镜 P 分为两束:反射的一束经平面反射镜 M_1 的反射和透镜 L_1 扩束后投射到全息干版 H 上称为参考光波 R ;透射的一束经透镜 L_2 扩束后由 M_2 反射到物体上,作为物体的照明光,由物体 O 漫反射的光称为物光波。在物体照明光束中插入毛玻璃是为了使对物体的照明光均匀。参考光波和物光波相干涉的干涉图形被全息干版 H 记录下来,通过显影处理后即得到一张全息图。图 1-1(b)是再现光路,用照明光波 C 照射全息图 H,即得到再现的原始像 I_O 和共轭像 I_C 。下面介绍记录与再现过程的数学描述。

为简单起见,物光波和参考光波均用在记录平面上的复振幅表示,物光波和参考光波分别为

$$O(x, y) = O_0(x, y) \exp[j\varphi_O(x, y)] \quad (1-1)$$

和

$$R(x, y) = R_0(x, y) \exp[j\varphi_R(x, y)] \quad (1-2)$$

式中 (x, y) 是记录平面上一点的坐标, O_0 和 R_0 分别表示该点物光和参考光的振幅, φ_O 和 φ_R 则表示其相位,但此相位大小是相对于原点的相位而言,即以原点的相位为零时,该点的相位大小。

物光波的相位是很复杂的,对于一个点物来说有

$$\varphi_O(x, y) = k_0 \left\{ \frac{1}{2l_O} [x^2 + y^2 - 2(x_0 - y_0)] - \frac{1}{8l_O^3} [(x^2 + y^2)^2 - 4(x^2 + y^2)(xx_0 + yy_0) + 4(xx_0 + yy_0)^2 + \dots] \right\} \quad (1-3)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 是记录用的波长, l_O 是点物与记录面上 (x, y) 点的距离, (x_0, y_0) 是点物的坐标。

参考光波一般是简单的平面波或球面波,其相位函数可用下述公式表示。

$$\varphi_R(x, y) = k_0 x \cos \alpha \quad (\text{平面波})$$

$$\varphi_R(x, y) = k_0 \left(\frac{x^2 + y^2}{2l_R} - x \cos \alpha \right) \quad (\text{球面波}) \quad (1-4)$$

式中 l_R 是参考光源 R 与记录平面上原点 o 的距离, α 是参考光方向与 x 轴的夹角。

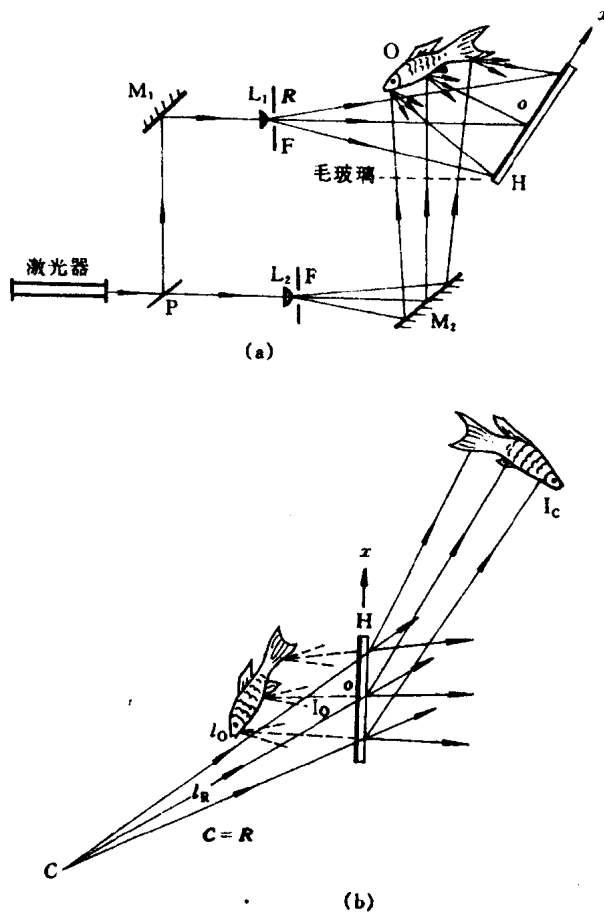


图 1-1 全息图的记录与再现光路

(a)记录

(b)再现

由于物光波和参考光波相干涉,故在全息干版的曝光强度分布为

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= |\mathbf{O} + \mathbf{R}|^2 \\
 &= \mathbf{O}\mathbf{O}^* + \mathbf{R}\mathbf{R}^* + \mathbf{O}\mathbf{R}^* + \mathbf{O}^*\mathbf{R} \\
 &= (\mathbf{O}_0^2 + \mathbf{R}_0^2) + \mathbf{O}\mathbf{R}^* + \mathbf{O}^*\mathbf{R} \\
 &= (\mathbf{O}_0^2 + \mathbf{R}_0^2) + O_0 R_0 \exp[j(\varphi_O - \varphi_R)] + O_0 R_0 \exp[-j(\varphi_O - \varphi_R)] \\
 &= (\mathbf{O}_0^2 + \mathbf{R}_0^2) + 2O_0 R_0 \cos(\varphi_O - \varphi_R)
 \end{aligned} \tag{1-5}$$

$I(x, y)$ 即记录全息图的曝光强度,从最后一式看,强度是按余弦规律变化的,说明形成干涉条纹。曝光量 H 等于曝光强度 I 与曝光时间 t 的乘积,即 $H = It$ 。

在线性记录条件下,全息图的复振幅透射系数为

$$T_H = \beta_0 + \beta H = \beta_0 + \beta t (\mathbf{O}\mathbf{O}^* + \mathbf{R}\mathbf{R}^* + \mathbf{O}\mathbf{R}^* + \mathbf{O}^*\mathbf{R}) \tag{1-6}$$

式中 β_0 是全息干版的本底常数, β 是全息干版透射系数与曝光量关系 ($\tau-H$) 曲线的线性部分的斜率。全息图复振幅透射系数代表全息图的特性,也可用下述普遍公式表示:

$$T_H = \tau_H(x, y) \exp[j\varphi_H(x, y)] \tag{1-7}$$

式中 $\tau_H(x, y)$ 为振幅透射系数, $\varphi_H(x, y)$ 为全息图的相位分布。

全息图的再现像一般是用与参考光波相似的光波(称为再现照明光波 C)照射全息图来实现的,该光波用下式表示:

$$C(x, y) = C_0(x, y) \exp[j\varphi_C(x, y)] \quad (1-8)$$

则再现光波的一般公式为

$$W(x, y) = C(x, y) T_H(x, y) \quad (1-9)$$

如果用原参考光作为照明光,则 $C(x, y) = R(x, y)$,再现光波为

$$\begin{aligned} W(x, y) &= R(x, y) T_H(x, y) \\ &= \beta_0 R_0 \exp[j\varphi_R(x, y)] \\ &\quad + \beta_1 O_0^2 R_0 \exp[j\varphi_R(x, y)] \\ &\quad + \beta_2 R_0^3 \exp[j\varphi_R(x, y)] \\ &\quad + \beta_3 R_0^2 O_0 \exp[j\varphi_O(x, y)] \\ &\quad + \beta_4 R_0^2 O_0 \exp[-j\varphi_O(x, y) + j2\varphi_R(x, y)] \end{aligned} \quad (1-10)$$

由上式可见,等号右边第一项为被衰减的参考光;第二项和第三项均沿参考光方向传播,但振幅受到调制,形成围绕参考光的光晕;第四项是原始像光波,它在原物位置形成虚像 I_0 ;第五项为共轭像光波,其主光线与参考光的夹角大致和原始像光波与参考光的夹角相等,但位在参考光方向的另一边形成实像 I_c ,见图 1-1(b)。

§ 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,现根据其主要特征加以说明^[1.1]。

一、按制作全息图的方法分类

制作全息图的主要方法有两种:光学记录全息图和计算机制作全息图。光学记录全息图上节所述是在记录材料上拍摄参、物光波干涉条纹图形的方法。计算机制作全息图则是先用计算机算出全息图上各抽样点参、物光波干涉后的复振幅,然后采用一种编码技术,用计算机绘图仪绘制出放大的全息图,再用缩微像机缩小到应有的尺寸。这种全息图虽然在制作时较为复杂,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。

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,以及模压复制技术等。

二、按全息图复振幅透射系数(或反射系数)分类

全息图的复振幅透射系数 T_H 为一复数量,表明照明光波通过全息图时,振幅和相位均发生改变。当只有振幅变化时,称为振幅全息图。如用全息干版制作的全息图就是振幅型的,这时全息图的透射系数 T_{HA} 为实函数,有

$$T_{HA} = \tau_H(x, y) \propto \beta I t \quad (1-11)$$

若只有相位变化,则称为相位型全息图,这时全息图的透射系数 T_{HP} 为

$$T_{HP} = \exp[j\psi(x, y)] \quad (1-12)$$

式中

$$\psi(x, y) \propto \beta I t \quad (1-13)$$

由于记录材料的厚度变化或折射率变化都会使透射系数的相位项改变。所以相位全息图又分为两种:分别称为浮雕全息图和折射率调制的全息图。如用光致抗蚀剂和光导热塑料制作的全息图是浮雕型的;用重铬酸盐明胶制作的全息图是折射率调制的。但卤化银全息干版制作的全息图经漂白处理后,严格讲是混合型全息图。

三、按全息图的结构分类

全息图中干涉条纹的结构与参、物光波的射向和波形密切相关。参、物光波自记录介质的一侧入射时,形成透射全息图,分别自两侧入射形成反射全息图。以参、物光波均为平面波作例子,图 1-2 是透射全息图,图 1-3 是反射全息图。又记录介质有厚薄之分,反射全息图由于条纹面接近平行于记录介质表面,用薄记录介质制作时只有少数条纹面。因此反射全息图一般指厚全息图。反射全息图也称为李普曼全息图。

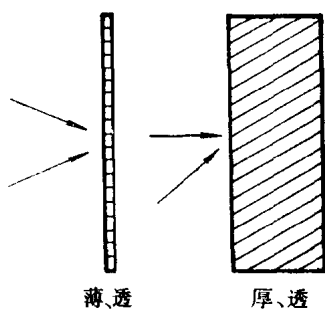


图 1-2 透射全息图的结构

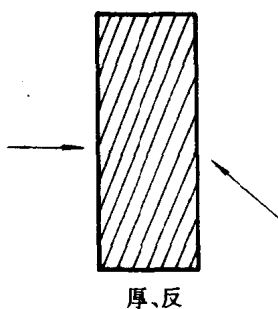


图 1-3 反射全息图的结构

四、按参、物光波主光线的方向分类

参、物光波通过全息图中心的光线称为主光线,两主光线方向相同的称为同轴全息图,不同的称为离轴全息图。以球面波为例,设物体为一点物,参考光为球面波。其同轴全息图的干涉条纹是一组同心圆环或椭圆[见图 1-4(a),(b)]。离轴全息图的条纹形状为迴转圆锥曲面截线的一部分[见图 1-4(c)]。

五、按物体的衍射光场分类

因为在全息记录过程中物体是被照明的,全息图记录了物体的衍射光波。在物理光学中,衍射光场分为三种类型^[1,2]。瑞利-索末菲(Rayleigh-Sommerfeld)衍射、菲涅耳(Fresnel)衍射及夫琅禾费(Fraunhofer)衍射。三个区域的划分如图 1-5 所示。图中以单缝衍射说明衍射光场的变化,在靠近物体的索末菲衍射区,衍射光场的强度分布与物体光强的分布十分相似。达到菲涅

耳衍射区以后,强度分布随远离物体变化很快。达到夫琅禾费衍射区以后相对强度分布不再变化。设物面上的坐标为 (x_0, y_0) ,物面与全息图的距离为 z_0 ,则菲涅耳近似的条件为

$$\frac{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]^2}{8z_0^2} \ll \lambda$$

式中 x, y 为全息图上一点的坐标。

夫琅禾费近似条件为

$$\frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_0} \ll \lambda$$

在满足上述两个条件时,记录的全息图分别称为菲涅耳全息图(见图 1-1)和夫琅禾费全息图(见图 1-6),在图 1-6 中(a)称为无透镜夫琅禾费全息图,(b)称为有透镜夫琅禾费全息图

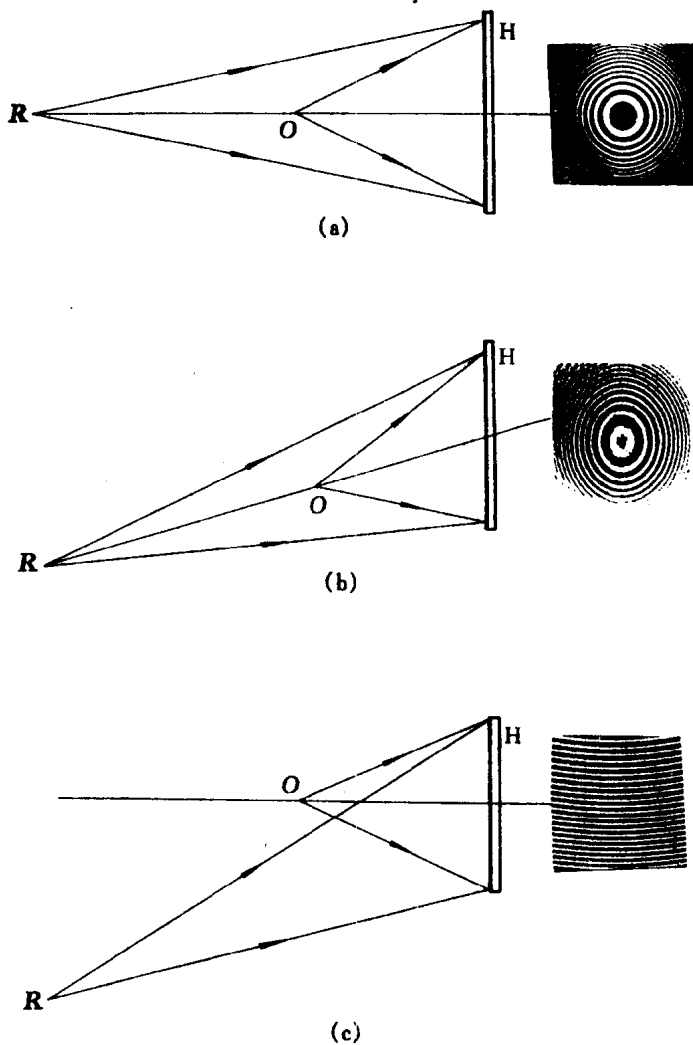


图 1-4 三种全息图的记录光路
(a),(b)同轴全息图;(c)离轴全息图

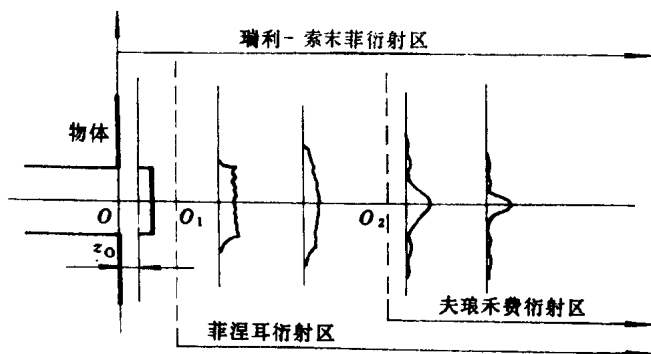
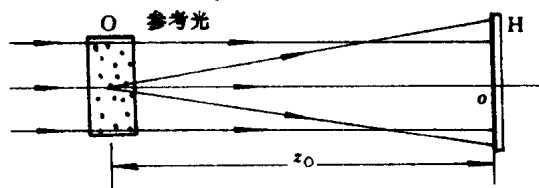
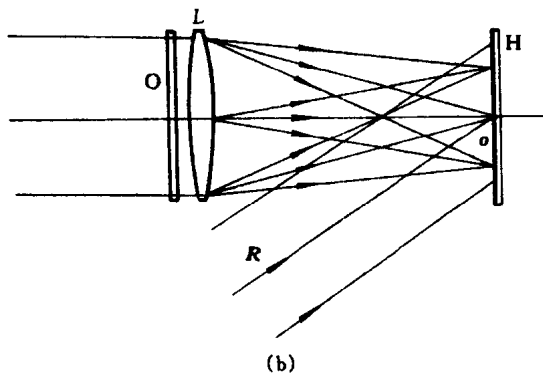


图 1-5 衍射区的划分



(a)



(b)

图 1-6 夫琅禾费全息图

(a)无透镜夫琅禾费全息图；(b)有透镜夫琅禾费全息图

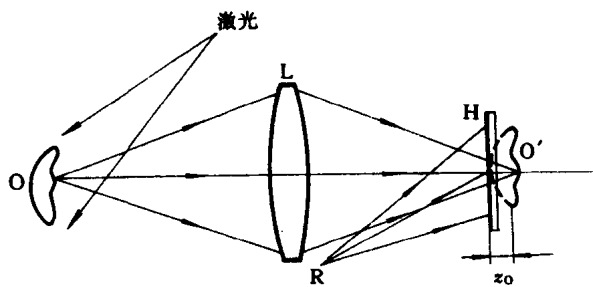


图 1-7 像全息图记录光路

如果物体非常靠近全息记录介质,或跨立在记录介质上,则属于索末菲全息图。但由于此时

无法照明物体,需要采用成像的方式使物体成像在记录介质附近,因而也叫做像全息图。透射的像全息图记录光路见图 1-7。

反射的索末菲全息图可以直接记录,通常采用一种单光束记录光路,见图 1-8。

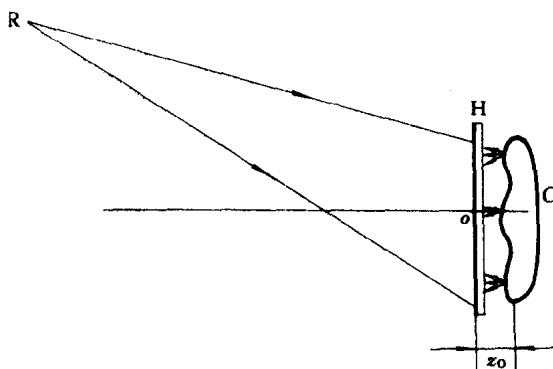


图 1-8 单光束记录反射全息图

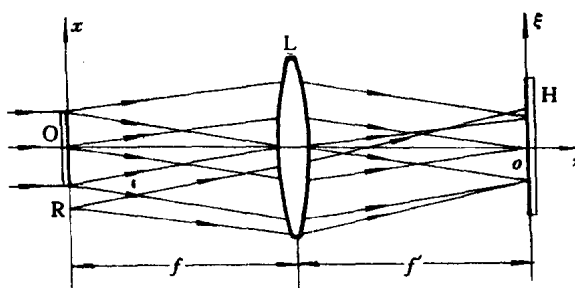


图 1-9 有透镜傅里叶变换全息图

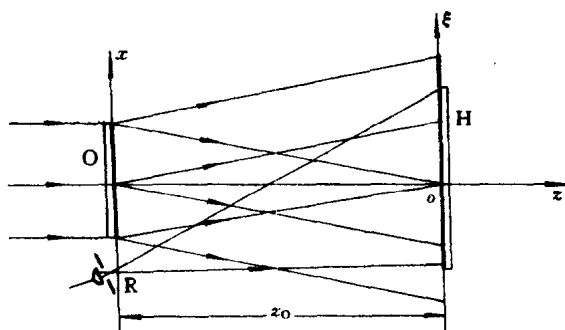


图 1-10 无透镜傅里叶变换全息图

另有一种全息图称为傅里叶变换全息图,从衍射场考虑接近于夫琅禾费全息图,但它有严格的定义和特征,主要是记录系统中物体与参考光源位在同一平面内,它的点基元全息图是平行等距的。再现像可以通过全息图作傅里叶变换而得到,并且在全息图有横向位移时其再现像的位置仍保持不变。傅里叶变换全息图的这些特征使它在信息的高密度存储、空间滤波、光信息处理中有着十分重要的用途。

傅里叶变换全息图主要分有透镜和无透镜两种,可以是透射的或反射的。图 1-9 和 1-10 分别为有透镜和无透镜傅里叶变换全息图的记录光路。在有透镜的傅里叶变换全息图中,物体

位在透镜的前焦面,在后焦面上是物体光分布的严格傅里叶变换。但要注意物体是被平行光照明,记录面是位在后焦面上,随着物体的照明光波波面曲率的不同还可以有一些改型的记录光路^[1.3]。此处不再赘述。

§ 1-3 薄全息图的衍射效率^[1.3]

全息图的衍射效率定义为衍射成像的有效光通量与再现用照明光的总光通量之比,成像的有效光通量一般指正或负一级衍射像的最大光通量。衍射效率的计算也可通过全息图的振幅透射系数平方来求得。

衍射效率的大小与全息图厚薄、调制波型、调制幅度大小、记录材料的调制传递函数以及记录材料的性质有关。相位型记录材料的衍射效率总是大于振幅型的,另外记录全息图时,物光波的光场分布是复杂的,各部分的衍射效率又随干涉条纹调制度的不同而变化。记录材料的调制传递函数又是全息图空间频率的函数,所以一实际全息图的衍射率效率计算是很复杂的,只有用实验方法做准确的测量。但是为了对不同类型全息图的衍射效率有一个参考值,我们介绍参、物光波为平面波,且调制度和调制传递函数为最大(等于1)的情况下的衍射效率,即理想情况下全息光栅的衍射效率。

一、振幅型薄全息图的衍射效率

正弦型振幅薄全息图的透射系数可以写为

$$\begin{aligned} T_{HA} &= \tau_0 + \tau_1 \cos 2\pi \xi x \\ &= \tau_0 + \frac{\tau_1}{2} (e^{j2\pi \xi x} + e^{-j2\pi \xi x}) \end{aligned} \quad (1-14)$$

式中 ξ 为全息图光栅结构沿 x 方向的空间频率,它与参、物光波的夹角有关; τ_0 是平均透射系数; τ_1 是调制幅度。在理想情况下, $\tau_0 = 1/2$, $\tau_1 = 1/2$ 。最大衍射效率为

$$\eta = (\tau_1/2)^2 = (1/4)^2 = 6.25\%$$

非正弦型全息图的透射系数按照频谱分析可写成

$$\tau_{HA} = \tau_0 + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \tau_m [\exp(j2\pi \xi_m x) + \exp(-j2\pi \xi_m x)] \quad (1-15)$$

在最佳情况下,成为矩形函数,有 $\tau_0 = 1/2$, $\tau_1 = 2/\pi$,正、负一级的衍射效率为

$$\eta = \left(\frac{\tau_1}{2} \right)^2 = \frac{1}{\pi^2} = 10.3\%$$

可见矩型函数分布的全息图衍射效率高于正弦型的。如利用非线性曝光可以得到近似矩型分布的衍射光栅,就可以适当提高衍射效率。

二、相位型薄全息图的衍射效率

正弦型薄相位全息图的透射系数可以写成

$$\tau_{HP}(x) = \tau_0 \exp[j\psi(x)]$$

$$= \tau_0 \exp[j(\psi_0 + \psi_1 \cos 2\pi \xi x)] \quad (1-16)$$

如果忽略材料的吸收, $\tau_0 = 1$, 且有

$$\exp(j\psi_1 \cos 2\pi \xi x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} j^m J_m(\psi_1) \exp(-jm2\pi \xi x) \quad (1-17)$$

式中 $J_m(\psi_1)$ 为第一类贝塞耳函数, 这样第 m 级的衍射效率公式为

$$\eta_m = |j^m J_m(\psi_1)|^2 \quad (1-18)$$

图 1-11 画出 $J_m - \psi_1$ 曲线, ψ_1 与记录介质、记录和处理条件有关。在理想的情况 J_1 为极大值时, $\psi_1 = 1.85$, $J_1(1.85) = 0.582$, $\eta_1 = (0.582)^2 = 33.9\%$, 所以薄相位全息图使正、负一级为最大时, 衍射效率为 33.9%。薄相位全息图也可通过改变 ψ_1 , 即改变曝光量使其它衍射级的衍射效率为最大。

矩形波薄相位全息图的衍射效率也稍大于正弦型的, 根据计算, 正、负一级的最大衍射效率为 40.4%。

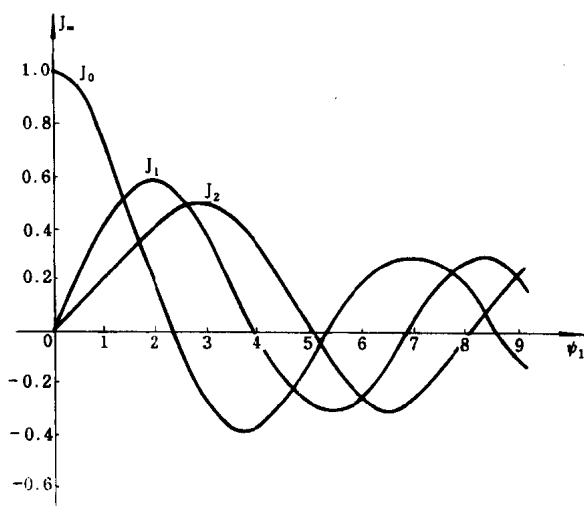


图 1-11 J_0 、 J_1 、 J_2 的图形

§ 1-4 厚全息图耦合波理论的衍射效率

克格尼克(H. Kogelnik)的厚全息图耦合波理论^[1,4]是早期较完善的讨论体积全息光栅衍射效率及其对波长和角度灵敏性的理论。他的基本思想是从麦克斯韦(Maxwell)方程组出发, 根据记录材料在曝光和显影处理以后的电学或光学常数的周期变化, 直接解方程组, 求出各种情况下的衍射效率公式。在本节中以两平面波的干涉形成的体积光栅为例, 给出理想情况透射和反射光栅的各种衍射效率公式, 以及它们的特性。

一、体积全息图的几何分析

体积全息图用厚记录材料。在线性记录条件下, 对于振幅型记录材料, 吸收系数 α 是按余

弦函数变化形成层状结构,可用下式表示为

$$\alpha = \alpha_D + \alpha_1 \cos(k_F \cdot r) \quad (1-19)$$

式中 α_D 是介质中的平均吸收系数, α_1 是吸收系数的调制幅度, k_F 是条纹面法线方向的传播矢量,它的大小是 $2\pi/\Lambda$, Λ 是条纹间距, r 是介质中的位移矢量。

对于相位型记录材料,与上式对应的折射率的变化为

$$n = n_D + n_1 \cos(k_F \cdot r) \quad (1-20)$$

式中 n_D 为记录介质的平均折射率, n_1 是折射率调制幅度。应当指出,这里 α 和 n 的变化在整个光栅内部相同是因为忽略记录光栅时材料的吸收作用。另外说明浮雕型记录材料在一般情况下不能记录体积全息图,除非利用特殊的记录技术。

1. 透射全息图

参考图 1-12, 设入射面与 xoz 面平行, θ_R 和 θ_O 为平行参、物光波的入射角, ψ_R 和 ψ_O 是进入记录介质后的折射角。在记录介质中条纹面平分参、物光束之间的夹角 ($\psi_O - \psi_R$)。用 Φ 表示条纹面法线方向 (k_F 方向) 与 z 轴的夹角, 在记录材料中参、物光波的传播矢量为 k_R 和 k_O , 其大小为

$$k_R = k_O = \frac{2\pi}{\lambda_D} = \frac{2\pi n_D}{\lambda_0} \quad (1-21)$$

式中 λ_0 是在空气中的记录波长, λ_D 是在记录介质中的波长。给定 k_R 和 k_O , 便可求得 k_F , 它们之间的关系是

$$k_F = k_O - k_R \quad (1-22)$$

三个矢量位在同一平面内, 且构成一封闭的矢量三角形, 将其画在图 1-12 的右下方, 很易看出条纹面间距为

$$\Lambda = \frac{\lambda_D}{2 \sin \frac{1}{2}(\psi_O - \psi_R)} = \frac{\lambda_D}{2 \sin B} \quad (1-23)$$

式中 $B = (\psi_O - \psi_R)/2$, 称为布拉格角。

在对称光路记录的情形, 有 $\theta_O = -\theta_R$, $\psi_O = -\psi_R$, 如图 1-13 所示, 条纹面间距为

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2 n_D \sin B} = \frac{\lambda_D}{2 \sin \theta_O} \quad (1-24)$$

这时 k_F 的方向与 z 轴垂直, 即有 $\Phi = 90^\circ$ 。

下面用平面光波 C 照明全息图说明再现光的机制。如图 1-14 所示, 平面波 C 以 θ_C 角入射在全息图上, ψ_C 为对应的折射角, k_C 是照明光波在记录介质中的传播矢量。实际情况因为光栅的间距 Λ 很小, 每一束照明光波都要经过许多条纹面, 在每一个条纹面上都要衍射光, 许多层衍射光相干叠加后, 以 k_I 矢量方向达到全息图的另一界面, 又以出射角 θ_I 离开界面, 构成再现光波, 在记录介质中 k_I 、 k_F 和 k_C 存在下述关系:

$$k_I = k_C - k_F \quad (1-25)$$

在记录介质中, 三个矢量组成一个封闭三角形, 位在入射面内, k_C 和 k_I 矢量可用下述列矩阵表示(参考图 1-15):