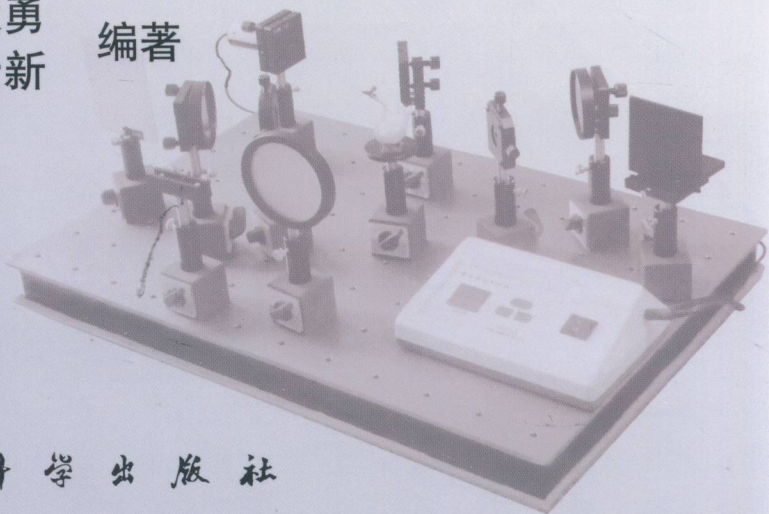


Guangxue tiquanxi
jishu
ji yingyong

光学体全息 技术及应用

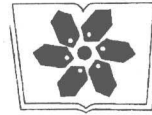
陶世荃 江竹青 王大勇 编著
万玉红 王云新



科学出版社

0438.1
20132

阅 览



中国科学院科学
出版基金资助出版

北京工业大学
“211工程”资助出版

光学体全息技术及应用

陶世荃 江竹青 王大勇 编著
万玉红 王云新

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是关于光学体全息术的专著。全书共8章,首先介绍体全息的基本概念,然后全面介绍光学体全息的理论、材料、技术和应用。其中理论部分重点介绍耦合波理论;材料部分重点分析光折变晶体和光致聚合物的全息记录原理和特性;技术部分着重介绍实现多重全息记录的复用技术;本书用较大篇幅介绍体全息技术的应用领域,包括体全息信息存储技术、基于体全息复用的光学相关器、体全息成像技术与器件,以及基于体全息的光子器件等,展望了体全息技术的当前研究前沿和实用化前景。

本书内容翔实,并提供了国内外近年来在本领域丰富的参考文献,可供光信息技术研究人员与工程应用人员阅读,也可供大专院校光学、光学工程和光电子学等相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

光学体全息技术及应用/陶世荃等编著. —北京:科学出版社,2013.3
ISBN 978-7-03-036843-0

I. ①光… II. ①陶… III. ①全息光学 IV. ①0438.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第039604号

责任编辑:刘鹏飞 张丽花 责任校对:包志虹
责任印制:闫磊 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年5月第一版 开本:787×1092 1/16

2013年5月第一次印刷 印张:24

字数:614 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

总 序

“211工程”是新中国成立以来教育领域唯一的国家重点建设工程,面向21世纪重点建设100所高水平大学,使其成为我国培养高层次人才,解决经济建设、社会发展和科技进步重大问题的基地,形成我国高等学校重点学科的整体优势,增强和完善国家科技创新体系,跟上和占领世界高层次人才培养和科技发展的制高点。

中国高等教育发展迅猛,尤其是1400所地方高校已经占全国高校总数的90%,成为我国高等教育实现大众化的重要力量,成为区域经济和社会发展的主要生力军。

在北京市委、市政府的高度重视和大力支持下,1996年12月我校通过了“211工程”部门预审,成为北京市属高校进入国家“211工程”重点建设的百所大学之一。我校紧紧抓住“211工程”建设和举办奥运的重要机遇,实现了两个历史性的转变:一是实现了从单科性大学向以工科为主,理、工、经、管、文、法相结合的多科性大学的转变;二是实现了从教学型大学向教学研究型大学的转变。“211工程”建设对于我校实现跨越式发展、增强服务北京的能力起到了重大的推动作用,学校在学科建设、人才培养、科学研究、服务北京等方面均取得了显著的成绩,综合实力和办学水平得到了大幅度的提升。

至2010年底,我校的学科门类已经覆盖了8个:工学、理学、经济学、管理学、文学、法学、哲学和教育学。现拥有8个一级学科博士学位授权点、37个二级学科博士学位授权点和15个博士后科研流动站,15个一级学科硕士学位授权点和81个二级学科硕士学位授权点;拥有6种类型硕士研究生专业学位授权资格,工程硕士培养领域19个;拥有3个国家重点学科、16个北京市重点学科和18个北京市重点建设学科。

目前,学校有专任教师1536人,全职两院院士5名,博士生导师220人,有正高职称294人和副高职称580人,专任教师中具有博士学位教师的比例达到54.6%。有教育部“长江学者”特聘教授4人,国家杰出青年基金获得者6人,入选中组部“千人计划”1人,北京市“海聚工程”3人,教育部新(跨)世纪优秀人才支持计划15人。

2010年学校的到校科研经费为6.2亿元。“十一五”期间,学校承担了国家科技重大专项28项,“973计划”项目16项,“863计划”项目74项,国家杰出青年基金2项,国家自然科学基金重点项目8项,科学仪器专项2项,重大国际合作项目1项,面上项目和青年基金项目347项,北京市自然科学基金项目180项,获国家级奖励14项。现有1个共建国家工程研究中心,7个部级或省部共建科研基地,11个北京市重点实验室和3个行业重点实验室。

为了总结和交流北京工业大学“211工程”建设的科研成果,学校设立了“211工程”专项资金,用于资助出版系列学术专著。这些专著从一个侧面代表了我校教授、学者的学科方向、研究领域、学术成果和教学经验。

展望北京工业大学未来,我们任重而道远。我坚信,只要我们珍惜“211工程”建设的重要机遇,构建高层次学科体系,营造优美的大学校园,我校在建设国际知名的、有特色、高水平大学的进程中就一定能够为国家、特别是为北京市的经济建设和社会发展作出更大的贡献。

中国工程院院士
北京工业大学原校长 左铁镛

2011年6月

前 言

在信息技术飞速发展的今天,信息的高速、大规模存储、传输和处理一直是技术研究的热点。光全息术是光学与信息科学极好的结合点,而体全息术由于可以将海量光信息完整地保存在介质的整个体积中,因此在信息存储、成像、光通信、光电子器件等领域有独特的优势。在当前不同学科间的交叉和融合日益活跃的情况下,体全息的研究也进展迅速并得到广泛的应用。全息学作为光学的一个分支,已成为高等院校光学、光学工程、应用物理、光信息科学与技术、信号处理、测量技术等专业课程的重要教学内容。为了适应科技发展和国内科研、生产、教学的需要,我们编著了本书。

本书总结了国内外30余年来在体全息领域的优秀研究成果和最新进展,也包括了作者团队在执行国家“973计划”项目、国家自然科学基金、北京市自然科学基金等一系列国家和地方的科研项目过程中的创新研究成果。本书在编写过程中力求结构体系严谨,理论分析清晰,视角广阔,材料全面翔实,密切联系应用实践;不仅给广大读者介绍这一活跃领域的发展全貌和前沿趋势,也为有兴趣深入研究的读者提供丰富的参考文献目录。

全书共8章,可以分为两大部分。第1~4章为基础部分,其中第1章介绍体全息的基本原理和发展状况;第2章讨论体全息的基本理论分析方法,重点是耦合波理论和积分方程理论;第3章阐述体全息记录材料,重点是光折变晶体和光致聚合物材料;第4章介绍体全息的各种复用技术,在详述各种共同体积复用技术的基础上介绍混合的复用技术。第5~8章为应用部分,其中第5章集中讨论体全息首要的应用领域——高密度光信息存储;第6章重点介绍在体全息图像库基础上的光学相关识别系统;第7章介绍体全息光学元件的成像原理和系统;第8章以典型实例综合介绍体全息在当前光子学前沿领域其他分支中的应用。

本书的编写分工如下:

陶世荃撰写了第2章、第4章,以及8.1节、8.2节和8.6节;江竹青撰写了第3章和第7章;万玉红撰写了第1章、第5章,以及8.5节和8.7节;王大勇撰写了第6章;王云新撰写了8.3节和8.4节。全书由陶世荃负责定稿。参加本书编写、整理、校核和插图绘制等工作的还有宋伟、翟千里、丁茂恋、林琳、陈昊、王羽佳、伍江涛等。

在本书写作和成书过程中得到国内光学与全息学领域许多专家学者的关心、帮助与指导,徐大雄院士、杨伯君、俞宽新、孙雨南、余重秀、姚保利、李云章、王肇圻、赵榆霞、朱伟利等教授在定稿前分别审阅了部分样章,科学出版社的编辑进行了细心的讨论,作者在此表示衷心的感谢。书中许多内容是国内外同行多年来研究的结晶,他们的辛勤工作构成了本书的基础;有近50名博士、硕士研究生参与了作者团队承担的与本书有关的科研项目,他们也对本书作出了

贡献，作者在此一并表示感谢。

本书的出版，得到了中国科学院科学技术学术著作出版基金及北京工业大学“211工程”出版基金的资助，作者对此深表谢意。

本书内容包括的范围较广，涉及的专业内容较多，作者虽然力图给出最新最全的文献资料，但仍难免挂一漏万。由于作者水平有限，书中的问题在所难免，热忱欢迎读者批评指正。

作者
2012年12月

目 录

总序

前言

第 1 章 体全息概述	1
1.1 全息术发展简史	1
1.1.1 衍射光栅的基本概念和发展	1
1.1.2 拉曼-奈斯衍射和布拉格衍射	3
1.1.3 体全息术的发明	4
1.1.4 全息术的应用概述	5
1.2 光学全息术的基本原理	6
1.2.1 全息图的基本描述	6
1.2.2 基元全息图	8
1.2.3 全息图的分类	9
1.2.4 全息图的衍射效率	11
1.3 体全息图	11
1.3.1 体全息图的记录与布拉格衍射再现	11
1.3.2 体全息图的类型	12
1.3.3 体全息基本分析工具—— k 矢量圆	14
1.3.4 体光栅选择性的物理解释	15
第 2 章 体全息的基本理论分析方法	17
2.1 光频电磁波在无源介质中的传播	17
2.1.1 麦克斯韦方程	17
2.1.2 介质的特性	17
2.1.3 有吸收、非均匀、各向同性介质中的波动方程	18
2.1.4 坡印廷定理	18
2.2 一维耦合波理论	19
2.2.1 耦合波方程的推导和求解	20
2.2.2 体光栅的衍射效率和选择性	23
2.3 耦合波理论的其他表述	30
2.3.1 严格的耦合波理论	30
2.3.2 矢量耦合波理论	36

2.4	二维耦合波理论及其数值解法	37
2.4.1	二维受限体光栅的二维耦合波方程及其闭形式解析解	38
2.4.2	基于二维耦合波理论的光栅衍射特性研究	42
2.4.3	二维耦合波方程的数值解法	45
2.5	积分方程理论	48
2.5.1	非均匀介质中的波动方程	48
2.5.2	波动方程的解	49
2.5.3	积分方程解法的应用	50
第3章	体全息记录材料	52
3.1	体全息对记录材料的基本要求	52
3.1.1	体全息图特征及其记录材料厚度	52
3.1.2	记录材料的调制传递函数	53
3.1.3	体全息记录材料的性能	53
3.2	银盐材料和重铬酸盐明胶	56
3.2.1	银盐材料	56
3.2.2	重铬酸盐明胶	58
3.3	光折变材料	59
3.3.1	概述	59
3.3.2	光折变晶体中折射率光栅的建立	61
3.3.3	光折变晶体内的两波耦合和衍射效率	68
3.3.4	全息时间常量和信息记录的易失性	73
3.3.5	热固定技术	75
3.3.6	光固定技术	85
3.3.7	其他无机光折变材料	94
3.4	光致聚合物	98
3.4.1	光致聚合物的组成及记录机理	98
3.4.2	光致聚合物的全息性能评价及测试	102
3.4.3	自由基聚合型光致聚合物的简化模型	105
3.4.4	光折变聚合物	111
3.4.5	聚合物分散液晶	111
3.5	光致变色材料和光致各向异性材料	115
3.5.1	概述	115
3.5.2	光致变色玻璃	117
3.5.3	有机光致变色材料和光致各向异性材料	119
3.6	持续光谱烧孔材料	122

3.6.1	概述	122
3.6.2	在光谱烧孔材料中的全息记录	125
3.7	材料的噪声及其抑制	126
3.7.1	散射噪声的成因及其表征	126
3.7.2	铈酸锂晶体的散射噪声及其抑制	128
第4章	复用技术	131
4.1	基于布拉格选择性的共同体积复用	131
4.1.1	角度复用	132
4.1.2	波长复用	136
4.1.3	电场复用	139
4.2	位相编码复用	143
4.2.1	正交位相编码复用	144
4.2.2	随机位相编码复用	151
4.3	偏振复用	157
4.3.1	普通全息与普通偏振全息	157
4.3.2	各向异性材料中的正交偏振全息	157
4.3.3	光致各向异性材料中的偏振全息	159
4.4	频域复用	163
4.4.1	光谱烧孔和频率选择光存储	163
4.4.2	频率选择的全息复用	164
4.5	混合复用技术	166
4.5.1	共同体积的多维复用	166
4.5.2	与空间复用结合	167
4.6	复用全息图的等衍射效率记录方法	172
4.6.1	共同体积复用	173
4.6.2	部分重叠的情形	180
第5章	体全息信息存储	183
5.1	光学体全息存储技术概述	183
5.2	体全息存储系统的关键器件	185
5.2.1	激光器	186
5.2.2	组页器	186
5.2.3	图像探测器	187
5.2.4	寻址器件	188
5.2.5	傅里叶变换镜头	190
5.3	数字数据的全息存储	196

5.3.1	纠错编码的必要性	197
5.3.2	调制-阵列码	198
5.3.3	其他数据处理技术	202
5.4	快速读出技术	205
5.4.1	数据读出速率基本概念及影响因素	206
5.4.2	盘式体全息存储系统的读出速率分析	208
5.4.3	空角复用的盘式全息存储快速读出系统的设计与实现	210
5.5	页面式体全息存储系统的主要构型	211
5.5.1	同轴/共线的体全息存储系统	212
5.5.2	双光束干涉(离轴型)的体全息存储系统	215
5.5.3	非易失性盘式体全息存储的关键技术及实现	217
5.6	微全息存储	223
5.6.1	微全息存储的机理	223
5.6.2	微全息存储技术的发展	225
第6章	基于体全息复用的光学相关器	228
6.1	光学相关与匹配滤波	228
6.2	体全息图像库	230
6.3	提高识别率的途径	233
6.3.1	光学高通滤波法	233
6.3.2	子波相关法	234
6.3.3	散斑调制法	236
6.3.4	相关系数法	237
6.3.5	多重频谱滤波法	238
6.4	采用体全息的光学相关系统实例	240
6.5	关联存储器	244
第7章	体全息成像技术	246
7.1	体全息成像系统及理论描述	247
7.1.1	体全息成像系统	247
7.1.2	体全息成像系统的点扩散函数	251
7.1.3	体全息光栅成像的基元光栅分析法	252
7.2	体全息系统的选择成像特性	254
7.2.1	体全息成像系统的深度选择性	254
7.2.2	体全息成像系统的横向选择特性	258
7.2.3	辅助光学系统参数对体全息选择成像特性的影响	260
7.3	体全息层析成像系统与方法	263

7.3.1	体全息层析成像基本原理	263
7.3.2	复用体全息透镜系统的分层成像应用	265
7.4	宽带光源的体全息成像特性	267
7.4.1	宽带光源成像基本原理	267
7.4.2	彩虹体全息成像法	268
7.4.3	宽带照明成像的视场和深度分辨率	270
7.4.4	体全息其他成像系统	271
第8章	基于体全息的光子器件	274
8.1	光互连和光交换中的体全息器件	274
8.1.1	光学互连和全息互连	274
8.1.2	光交换中的体全息器件——光开关	283
8.2	体全息波分复用器件	288
8.2.1	体全息波分复用器件的主要类型和性能	288
8.2.2	体全息波分复用器件的 TWOR 方案	295
8.3	波导全息器件	300
8.3.1	波导全息器件的结构和性质概述	300
8.3.2	波导全息图的典型应用	303
8.4	全息光子晶体	308
8.4.1	光子晶体概述	308
8.4.2	体全息与光子晶体	309
8.4.3	光子晶体的全息制作方法	310
8.5	体全息光栅在激光技术中的应用	316
8.5.1	谐振腔的模式选择原理与方法	316
8.5.2	PTR 体光栅横模选择元件	317
8.5.3	PTR 体光栅光谱窄化和稳频元件	319
8.6	超短脉冲全息术	322
8.6.1	时域全息	323
8.6.2	光谱全息	326
8.6.3	超短脉冲全息的应用研究	328
8.7	全息显示	331
8.7.1	全息图作为成像元件	332
8.7.2	全息图作为存储元件	334
8.7.3	大视场、真彩色三维显示	337
	参考文献	345

第 1 章 体全息概述

体全息术自 20 世纪 60 年代发明至今已走过了 50 多年的发展历程,成为了一门成熟的科学和技术。在过去的几十年中,研究人员对体全息术理论层面的研究已广泛开展,同时其应用不仅包括三维全息显示、高密度光信息存储,还涉及光学互连、光学神经网络、光学信息处理、衍射光学器件,以及体全息成像等众多领域。本章的目的是要为读者建立对体全息术的整体认识,首先从衍射光栅开始,回顾体全息术的历史起源、发展简史并概述全息技术的应用,然后给出全息图的基本描述和分类,最后介绍用于体全息图定性分析的工具——矢量圆,给出体全息图波长和角度选择性的定性分析。

1.1 全息术发展简史

1.1.1 衍射光栅的基本概念和发展

Syms 的著作^[1]通过人们对衍射光栅的认识和研究阐述了全息术起源的必要基础和背景。要对体全息术的来龙去脉有个完整的认识,追根溯源,还要从衍射光栅的发展说起。早在 1785 年,美国费城的发明家里腾豪斯(Rittenhouse)就通过丝制的手帕观察到了一些衍射现象。之后他在两根螺钉之间固定几根发丝,构成类似的周期性结构,也观察到了衍射的现象。但是,他的这个发现当时没有引起人们过多的注意。直到 1821 年,德国物理学家夫琅禾费(J. Fraunhofer)用极简单的金属丝网重复了里腾豪斯的实验,这种周期性结构的金属网才成为公认最早的人造光栅。1882 年,罗兰(Rowland)首先成功地建立了真正的光栅刻划机,后来迈克耳孙(Michelson)用干涉仪控制条纹位置,1955 年哈里森(Harrison)和斯托克斯(Stokes)把这一想法付诸实施。但是,刻划光栅一直存在制作困难和高成本的问题,原因是大多数光栅都是从母版复制而来的。激光器发明以后,衍射光栅的制作主要通过两束相干光干涉,在光敏材料中记录正弦模式的干涉图样。光学记录消除了机械刻划的固有误差,因而可以制备更高级复杂的光栅模式。

为了便于理解衍射光栅的基本原理,图 1.1.1 给出了一个简单的平面光栅衍射示意图。

假设无限大散射点阵列等间隔分布,沿 y 轴的间距为 Λ_y ,自由空间波长为 λ_a 的单色平面波入射到该光栅,与 x 轴夹角是 θ_0 ,记录光栅材料的折射率为 n ,则光栅内的有效光波长为 $\lambda = \lambda_a/n$ 。每个点是各向同性的独立散射,考虑光栅的周期性,只有当从任意相邻的两点(如图 1.1.1 中的 A 和 D 点)的散射光正好是同相位相加即光程差为波长的整数倍时,才

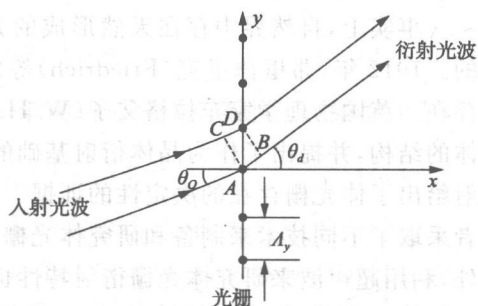


图 1.1.1 透射式平面光栅衍射示意图

可能出现衍射出来的平面波。根据光程差为波长的整数倍给出光栅衍射极大所满足的方程：

$$\overline{OL}_{AB} - \overline{OL}_{CD} = \Delta_y (\sin\theta_d - \sin\theta_o) = m\lambda$$

即
$$\sin\theta_d = \sin\theta_o + m\lambda/\Delta_y \quad (1.1.1)$$

式中， \overline{OL} 为光程， m 为整数，上式表明衍射只能在一系列离散的 θ_d 处发生。所以，光栅的作用就是把入射波分成很多沿不同方向传播的平面波，不同的 m 代表不同的衍射级次，衍射角度和波长有关，即光栅具有色散性质。白光入射时可以产生一系列光谱。由式(1.1.1)也可以看出，光栅间距减小，各衍射级的间距变大。对于薄的面光栅而言，通常可以观察到多个衍射级次，衍射强度几乎相等，所以此类光栅没有选择性。

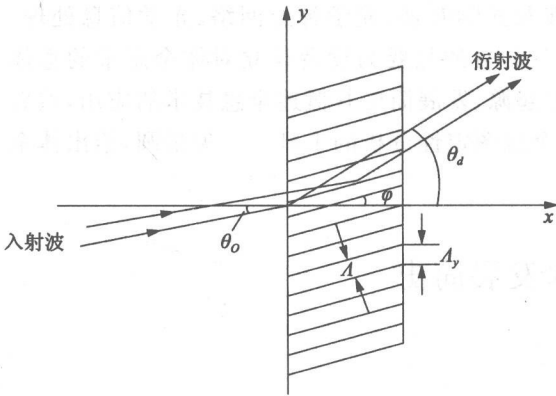


图 1.1.2 透射式体光栅衍射示意图

为了移除不用的衍射级次，须引入某种固有的选择性。如图 1.1.2 所给出的结构，如果记录材料足够厚，条纹倾斜为 φ ，条纹间距为 Δ ，沿 y 轴方向条纹间距是 Δ_y ($\Delta_y = \Delta/\cos\varphi$)。当光入射到该光栅时，仍要满足式(1.1.1)的光栅衍射条件，但同时散射光在 x 方向的分布也要满足各点散射光同相相加时，才能有衍射。也就是说，不仅要满足光栅的衍射定律，而且要满足光的反射定律，所以进一步限制了衍射角度，即 $\theta_d = \theta_o$ 或者 $\theta_d = 2\varphi - \theta_o$ 。如果 $\theta_d = \theta_o$ ，式(1.1.1)的解是 $m=0$ ，即为零级衍射。如果 $\theta_d = 2\varphi - \theta_o$ ，则

式(1.1.1)变为

$$2\Delta\sin(\varphi - \theta_o) = m\lambda \quad (1.1.2)$$

上式表明，其他衍射级次在入射角 θ_o 取某个特定角度时可以存在。将上式中 $\varphi - \theta_o$ 记为 θ 是入射光与条纹平面之间的夹角，考虑-1级衍射，则式(1.1.2)可以改写为

$$2\Delta\sin\theta = \lambda \quad (1.1.3)$$

此式称为布拉格条件或布拉格定律^[2]。当入射光与条纹平面之间的夹角满足布拉格条件时， $\varphi - \theta_o$ 称为第一布拉格角入射，此时可以观察到-1级衍射。

以上分析表明在布拉格域一次最多可以得到两个衍射级次，以第 L 个布拉格角度入射，可以得到零级和第一- L 级衍射。以其他角度入射，入射波直接透过而不会有任何改变。这一结构的“体”本质引入了固定的选择性。区别于面光栅，这种只有两个衍射级次的周期性结构称为光学“厚光栅”或者“体光栅”。

事实上，自然界中存在天然形成的光栅，其形式基本上是以原子在空间的规则排列存在的。1912年，弗里德里克(Friedrich)等发现了X射线的晶体衍射现象^[3]，这表明了体光栅的存在。英国物理学家布拉格父子(W. H. Bragg和W. L. Bragg)成功地测定了NaCl、KCl等晶体的结构，并提出了作为晶体衍射基础的著名公式——布拉格方程^[2]。1927年发现的电子衍射给出了体光栅存在的决定性的证据^[4]，因而也吸引了人们的研究兴趣，不同研究背景的研究者采取了不同技术来制备和研究体光栅。除了利用X射线、电子束来研究体光栅的衍射特性外，利用超声波来研究体光栅衍射特性也是一个重要的方面。

布里渊(Brillouin)于1922年预言了超声波在液体中的传播将形成光栅，当用光波垂直于声波传播方向入射照射该介质时将会发生光的衍射^[5]。10年后，这一预言先后被美国的德拜

(Debye)^[6]及法国的卢卡斯(Lucas)等^[7]从实验上进行了验证。之后拉曼(Raman)和奈斯(Nath)利用光程和微分方程的方法给出了出色的理论^[8-12],解释了声光衍射的大多数实验结果。

从衍射光栅的发展来看,对于布里渊的研究,基本上利用拉曼-奈斯衍射理论和布拉格衍射理论就可以解释光栅的衍射特性。本书主要涉及只发生布拉格衍射的体光栅。但是,为了便于读者理解,并区别不同类型的光路配置和衍射类型,下面分别给出拉曼-奈斯衍射和布拉格衍射的基本原理。

1.1.2 拉曼-奈斯衍射和布拉格衍射

超声波通过介质时引起介质的形变或者折射率变化,使介质出现疏密相间的周期性分布,如同一个相位光栅。当光通过这一受到超声波扰动的介质时就会发生衍射现象,也称为声光衍射。声光衍射现象可以分为拉曼-奈斯衍射和布拉格衍射两种情况,这主要取决于声光相互作用长度 L 的大小。声光衍射特征长度 L_0 定义为介质中的超声波波长 λ^* 的平方与介质中的光波长 λ 的比值,即

$$L_0 = \frac{(\lambda^*)^2}{\lambda} \quad (1.1.4)$$

当声光相互作用长度 $L \leq L_0/2$ 时,超声波光栅相当于面光栅;当光波入射到声光栅时,可以产生多个高级衍射模式,这就是拉曼-奈斯衍射。由于印度科学家拉曼和奈斯首先对这一现象做出了详细的理论解释,因而以他们的姓氏命名了该现象。声光栅的拉曼-奈斯衍射的示意图见图 1.1.3,图中 \mathbf{K}^* 为声波矢量, \mathbf{K} 为光波矢量的方向。

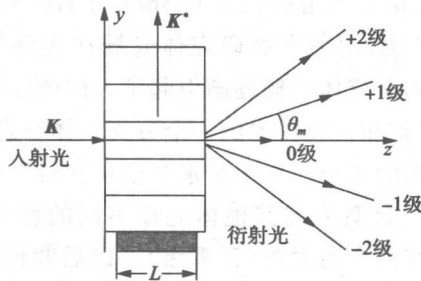


图 1.1.3 声光栅的拉曼-奈斯衍射示意图

根据光栅的特性和波动方程可以推导出,光波以垂直于声波矢量的方向正入射照明光栅时,可以得到一系列的衍射级。如果 λ 是自由空间的波长, Δ 是光栅周期(这里 $\Delta = \lambda^*$),则第 m 级衍射的传播方向角 θ_m 为^[8]

$$\theta_m = \sin^{-1} \left(\frac{m\lambda}{\Delta} \right), m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (1.1.5)$$

当入射光以与声波矢量夹角 ϕ 倾斜入射时,声光衍射更一般的情形可用下面的公式来描述^[9]:

$$\sin(\theta + \phi) - \sin\phi = m \frac{\lambda}{\Delta}, m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (1.1.6)$$

上述公式很好地解释德拜等所观察到的关于声光衍射的实验结果,即当光波正入射($\phi = 0$)时,衍射现象最明显,可以观察到多个衍射级。随着倾斜角 ϕ 的增加,可观察到的衍射级逐渐减少,且各衍射级的强度变弱。当 ϕ 增加到某个特定的值 α_1 ,只能观察到零级,其他衍射级消失,此时零级衍射的光强最大^[9]。当 ϕ 从 α_1 继续增加到 β_1 的过程中,中央零级衍射的光强

逐渐降低,其他高级衍射又依次出现, $\phi = \beta_1$ 的衍射情形和 $\phi = 0$ 时相同。当 ϕ 从 β_1 继续增加到 α_2 时,零级光斑变亮,高级衍射逐渐减少,直到 $\phi = \alpha_2$ 时,除了零级,其他的衍射级都观察不到了,如此按周期重复变化。实验观察到多个衍射级的角度变化范围非常小。例如,介质厚度 $d = 1\text{cm}$,声波波长为 $\lambda^* = 0.01\text{cm}$, $n = 1$,则可计算出 $\alpha_1 = 0.57^\circ$, $n = 1$, $\beta_1 = 1.146^\circ$ 。上述拉曼-奈斯衍射理论并没有考虑介质折射率随时间的变化。对于更广义的拉曼-奈斯衍射理论,读者可参考本书中所列文献[10-12]。

当声光相互作用长度满足 $L \geq 2/L_0$ 时,超声波通过介质形成的光栅相当于体光栅。在此种情形下,只有当入射光方向满足一定条件时,才有显著的声光衍射,并且衍射光只有两个衍射级:0级和+1级或者0级和-1级(如图1.1.4所示),即所谓的布拉格衍射。衍射光的方向仍满足式(1.1.3)。布拉格衍射只出现一束衍射光,且衍射效率可高达100%,所以在声光效应的实用上一般都采用布拉格衍射。

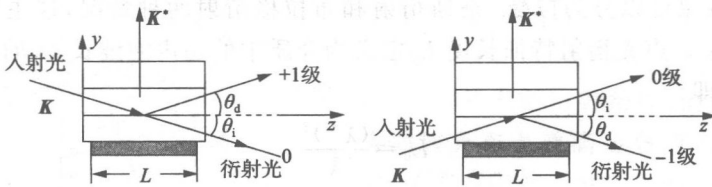


图 1.1.4 声光栅的布拉格衍射示意图

对于超声波入射到合适的材料(如液体或者晶体)中形成的体光栅,如果用可见光波段入射,要观察布拉格衍射,则要求的布拉格角非常小。例如,用频率为2GHz的超声波入射到晶体中形成体光栅,声波长是 $2\mu\text{m}$,当用波长为633nm的He-Ne激光入射时,可计算出的布拉格角仅有0.079rad。也就是说,用超声波研究体光栅在实际操作中很难观察到布拉格衍射。所以,利用可见光来制备和研究体光栅逐渐引起了人们的注意,从而不断发展起来。

体全息术是研究体光栅制备和衍射技术的一个分支。体全息光栅的特性与声体光栅有很多相似之处,但是这里需要强调的是声光栅不是永久记录在材料中的,它是动态变化的。体全息图是记录在材料中干涉图样,还具有与其他体光栅不同的性质。拉曼-奈斯衍射以多个衍射级为特征,而布拉格衍射只有两个衍射级(含零级)。以后我们会看到,对于体光栅,布拉格衍射域有定量的判据,因此在一定条件下即使以布拉格角入射也可能出现多级衍射。

1.1.3 体全息术的发明

体光栅最早的出现应该归功于李普曼(Lippmann),这位法国物理学家于19世纪末设计了一种独具匠心的技术来制作彩色相片^[13]。他的做法是在几毫米厚的感光乳剂的背面镀上一层水银作为反射层,聚焦在感光乳剂上的光与反射光形成驻波,此驻波在显影后就按照吸收光场强度的空间变化分布被保留在记录材料里。当这种照片被照明时,反射光的强度取决于驻波的强度,颜色由它们的频率决定,因此原始场景的色彩就可以被重现出来。

李普曼的这个想法实现起来是有难度的,但是其利用了体光栅的记录和再现的两步过程,这一应用为后面体全息技术的发明提供了必要的背景。1942年,布拉格为了直接从X射线的衍射模式中获得放大的像,提出了一种完全不同于李普曼的两步过程^[14],即通过相干光的近场和其远场衍射模式分布之间的傅里叶变换关系来实现X射线的衍射成像和再现。1948年,伽伯(Gabor)为了提高电子显微镜的分辨率,决定移走物镜,采用像布拉格的X射线显微镜的

两步过程来得到理想的放大率。但是,为了对一个一般的结构成像,需要记录振幅和位相信息,而记录材料只响应光强度。伽伯意识到用一个相干的参考光和从物体表面反射或散射的物光干涉可以把物信息的振幅和位相同时记录下来。由此提出了一个新的两步法无透镜的成像过程,称之为波前重建,也就是后来被人们公认的全息术^[15]。两束光的干涉图样就称为全息图,物光波的振幅和位相全部被记录下来,通过这个全息图可以得到原始的物信息三维像。

20世纪50年代,全息的理论和对全息术的理解得到了显著的延伸^[16-20]。20世纪60年代早期,全息术迎来了又一次革命性的发展。一是激光器为全息记录提供了良好的相干光源;二是密歇根雷达实验室的研究人员利斯(Leith)和乌帕特尼克斯(Upatnieks)意识到了全息术和雷达合成孔径成像的相似之处,将“载频”的概念引入全息记录过程,提出了离轴全息术^[21,22],解决了由伽伯提出的波前重建技术的孪生像问题。与此同时,前苏联科学家丹尼斯克(Densisyuk)结合李普曼的彩色照相术和伽伯的全息术,发明了反射全息术,由于采用厚的记录介质,也称其为“体积全息”^[23]。

激光器、离轴全息术和体积全息术的发明使全息术的研究又重放光彩并进入了一个新阶段,相继出现了彩虹全息^[24]、多重全息^[25]等多种全息方法,从而开辟了全息应用的新领域。

1.1.4 全息术的应用概述

全息术历经几十年的发展已经成为一门成熟的科学,大多数基本的科学问题已经解决。全息技术也经历大量的改进,并探索了许多应用。这些应用涵盖了全息成像,全息干涉计量、全息衍射光学元件、全息三维显示、全息信息存储和处理、计算机产生的全息图等多个方面。

全息术最基本的特性就是可以记录三维的物信息和再现物体的三维的像,平面全息图的应用也是基于这一特点。在成像领域,全息术的成功应用就是将其与传统的显微术结合起来的全息显微成像术。方法之一就是在显微镜系统中,先利用物镜对物体成放大的像,然后记录该放大像的全息图,再通过目镜观察再现的放大像^[26]。这一技术对位相物体和全息干涉显微非常有用^[27]。另一种技术是记录物体的全息图,利用显微镜系统观察再现的实像,此技术尤其适用于观察动态的三维粒子场分布。全息术可以在瞬时内记录动态的三维粒子场分布的全息图,通过再现不同深度的静态像,详细分析三维粒子场的特点^[28]。研究人员也试图把它应用到电子显微术^[28]和X射线光谱中^[29],目前这一领域仍然吸引了不少研究人员的兴趣,仍在持续研究中。全息技术也可以用于运动的散射介质成像^[30,31]、畸变的介质成像^[32]、高分辨率的投影成像^[33],以及多重成像^[34]等方面。

全息术另一个重要的应用是干涉测量。全息干涉仪测量有多种形式,如散斑干涉仪、时间平均干涉仪、多重曝光干涉仪、实时全息干涉仪等,但其基本的原理都是利用全息干涉存储时间或空间是波长不同的两个或多个光波场,再将 these 光波场重建之后,获取相应的信息^[35,36]。全息干涉仪一个重要的应用是无损测量^[37],适用于受压物体的表面结构形变,或者压力、温度的改变,以及振动测量分析分析等。

全息光学元件是光学衍射元件的进一步发展。与传统的衍射光学元件相比,全息光学元件具有口径大、重量轻、体积小,可形成重叠的多功能光学元件等优点。平面的全息光学元件(Holographic Optical Elements, HOE)在光波的波形整形^[38,39]、光束的扩束^[40]、光束的分束和合束、光学扫描器件^[41]等方面有重要的应用。