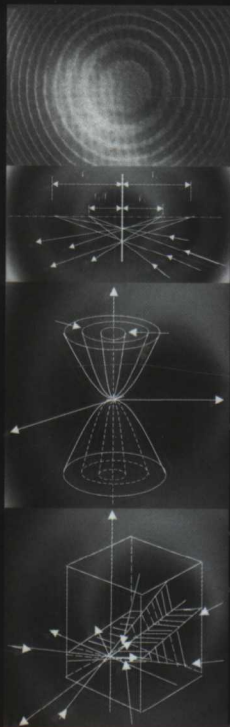


周海宪 程云芳 编著

全息光学

设计、制造和应用



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

周海宪 程云芳 编著

全息光学

— 设计、制造和应用 —



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心
· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

全息光学——设计、制造和应用/周海宪, 程云芳编著.
北京: 化学工业出版社, 2006.2
ISBN 7-5025-8314-9

I. 全… II. ①周…②程… III. 光学元件 IV. TH74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 014242 号

全息光学

——设计、制造和应用

周海宪 程云芳 编著

责任编辑: 仇志刚 窦臻

责任校对: 李 林

封面设计: 九九设计工作室

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 29½ 字数 591 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8314-9

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序


本书的作者长期从事全息光学研究，在北京理工大学学习时，就对全息光学有着浓厚的兴趣，毕业后致力于研制全息平视显示器，在此期间考入清华大学作为我的博士生更加深入和系统地进行全息光学理论和方法的研究，1991年取得博士学位。其后作为高级访问学者赴美国 University of Delaware 研修学习，在 Charles. S. Ih 教授的指导下继续从事全息光学的研究工作。1996年回国后查阅了大量的学术资料，开始撰写本书。

本书的确是凝聚了作者毕生的学识与经验，与国内外同类书相比，本书具有以下特点：

1. 重点在全息元件的设计与制造；
2. 理论结合实际；
3. 着重讲述了全息光学元件的设计方法与优化方法；
4. 详细地讨论了全息元件的像差；
5. 详尽地阐明了材料与制作工艺；
6. 介绍了由计算全息发展出来的二元光学元件；
7. 大量地介绍了全息光学元件的应用。

因此可以说这本书是集全息光学的大全，是科学技术领域中的一本大作，相信从事这方面研究工作的科技人员和学生读了此书都会获益匪浅。此书的出版也是作者对本学科的重要贡献，我衷心期待此书能早日出版，愿与读者共享阅读之乐，另外，此书的出版也必将对光学事业的发展发挥重要作用。

中国工程院院士，清华大学教授
国际光学委员会副主席



2006年2月于清华园

前 言

1948年，丹尼斯·加伯(D. Gaber)发明了全息摄影术即波前再现技术。全息术的基本原理是：用相干光照射一个物体，物体产生的衍射光波与一束相干参考光波相干涉，产生可视的、按一定规律分布的光强度干涉图样，用感光胶片将这种干涉图样记录下来，就形成全息图，该图中包含有物体的相位和振幅全部信息。若用参考光或其共轭光照射该全息照片，物体的相位和振幅信息就会重新再现出来。全息术是一种全新的光学成像方法，对古典的光学事业有着重大贡献，1971年，丹尼斯·加伯荣获物理学诺贝尔奖。

全息术的发展并非一帆风顺，三个关键性工程技术即激光光源的发明、离轴记录方式和空间滤波器的使用促进了光学全息术的进一步发展。通讯理论应用于全息技术，为光学全息学开辟了新的研究途径，光全息技术进入了迅速发展的时代。

光学全息术的应用范围很广，例如光学数据存储、光学测量、光纤通讯、光计算、光学集成、光学信号处理、目视显示系统等。全息光学元件或全息透镜(HOE)是光学全息术在光学成像和光学仪器领域中的重要应用。最具代表性的例子是机载全息平视显示器、全息头盔瞄准/显示装置和商业化的全息条码阅读机。

全息光学透镜、反射镜和分光镜等是一种新型的光学成像元件，无论设计还是零件制造，都不同于传统的“光学零件”概念。全息光学元件的成像不再服从几何光学的折射定律和反射定律，而是遵守衍射理论；全息光学元件的加工工艺不是粗磨、精磨和抛光，而是用光学干涉的方法记录下两束光的干涉图样，再经过适当的化学处理；光学零件一改往日的传统形状，即使平面全息光学元件在功能上也可以替代球面、甚至是非球面普通透镜；可以根据光学系统的需要和空间的限制把全息光学元件的外形(孔径方向)设计和加工为任意形状，对成像质量没有影响；计算全息术(CGH)与光学全息术相结合可以实现普通光学透镜无法实现的功能，产生普通光学透镜不能产生的波前。

全息技术的发明，尤其是激光器问世后，研究光学全息术的兴趣和热潮一直有增无减，光学全息术的各种会议和科技文章成千上万，散见于国内外各种刊物中。到目前为止，在国内外还没有一本系统介绍全息光学元件或全息透镜成像理论、制造方法和广泛应用的专著。为了使光学领域内的科技工作者全面和系统地理解、运用光学全息技术，设计和加工出更好的全息光学元件和系统，作者查阅了大量原始文献，收集了许多有代表性的设计思想和应用实例，对国内外的论文进行了分析和整理，编写了本书，集中和系统地论述了全息光学元件及折衍混合系统的设计方法、加工工艺及广泛应用，希望对光学工作者能够有所帮助。

本书内容除“绪论”外，包括十二章：

第1章阐述全息光学元件成像的基本原理；

第2章通过对全息光学元件与点源全息图及传统光学透镜由浅入深的比较，描述了全息光学元件的近轴成像理论，给出了基点的定义及基点的位置、各种放大率和衍射效率的计算公式。

第3章是全息光学的基础理论。从 Welford 矢量分析理论出发，叙述了全息光学元件设计过程中光线追迹的概念和必要的坐标变换。介绍了 K 矢量闭合分析法，递归法和等效透镜法等设计方法。

第4章介绍全息光学系统的具体设计，如全息 $f\theta$ 透镜的设计、厚全息光学元件的设计、准直全息光学元件的设计、红外全息光学元件的设计、非球面全息元件的设计、多端面全息元件的设计和层叠式体全息元件的设计。

第5章是全息光学元件的像差理论，介绍成像波长漂移和记录图形偏离造成的像差及其补偿方法，为光学设计工作者提供可以参考的优化途径。

第6章描述计算全息光学元件的编码技术和制造方法，分析非球面计算全息光学元件和折衍混合光学系统。

第7章和第8章是全息记录材料和记录技术。

第9章和第10章分别叙述全息光学元件的代表性应用：全息平视显示器、全息头盔瞄准/显示装置和全息扫描器。

第11章介绍全息光学元件在众多领域中的应用，为全息光学工作者未来的研究提供有益的参考。

第12章简要介绍目前国内外光学设计软件在设计全息光学元件中的应用。

本书第11章由程云芳编写，并对全书进行了认真的初校、审核和整理，其他章节由周海宪编写。书中的不妥之处，敬请指正！

清华大学的金国藩院士和美国特拉华大学的 Charles. S. Ih 教授对本书的出版给予了极大的关注，对有关章节提出了宝贵的修改意见；祖成奎、孙隆和、孙维国研究员，王涌天和安连生教授对该书的出版都给予了很大的支持，在此表示衷心的感谢。同时，也感谢曾威高级工程师和王希军、张良工程师的真诚帮助。

本书可供从事近代光学成像理论研究、在全息光学领域及光电子仪器设计和光学加工制造工艺研究的人员阅读，也可用作大专院校有关教师、本科学生和研究生的参考书。

作者

2006年1月

内 容 提 要

本书是一部系统、完整地介绍全息光学元件的成像理论、制造方法和广泛应用的专著。全书由绪论和十二章内容构成，分四个部分。第一部分叙述了全息光学元件成像的基本原理，近轴成像理论，光线追迹的概念和必要的坐标变换。第二部分介绍了全息光学系统的具体设计方法，成像理论及其补偿方法，计算全息光学元件的编码技术和制造方法，非球面计算全息光学元件和折衍混合光学系统。第三部分是全息记录材料和记录技术。第四部分重点介绍了全息光学元件的代表性应用。最后，简要地介绍了目前国内外设计全息光学元件的主要光学设计软件，为全息光学工作者未来的研究提供有益的参考。

本书对从事光学、光电子学、光通讯、光计算、全息光学研究和全息光学元件及系统制造的科技工作者有很好的参考价值。

目 录

绪论	1
参考文献	9
第 1 章 全息光学的基本原理	15
1.1 衍射光学	15
1.1.1 光的相干	15
1.1.2 光的衍射	17
1.1.3 波带片和衍射透镜	18
1.2 光学全息的基本原理	21
1.2.1 基本概念	21
1.2.2 数学分析	23
1.3 全息图的分类	25
1.3.1 振幅全息图和相位全息图	26
1.3.2 薄全息图和厚全息图	28
1.3.3 共轴全息图和离轴全息图	30
1.3.4 透射全息图和反射全息图	32
1.3.5 近场全息图和远场全息图	33
1.3.6 傅里叶变换全息图和针孔全息图	35
1.4 全息光学元件的弯曲	36
参考文献	38
第 2 章 全息光学元件的近轴成像理论	39
2.1 点源全息图和全息光学元件	39
2.2 全息光学元件的成像	40
2.3 全息光学元件的放大率	43
2.3.1 X 方向上的横向放大率 M_x	43
2.3.2 Y 方向上的横向放大率 M_y	44
2.3.3 Z 方向上的纵向放大率 M_z	44
2.3.4 横向放大率与纵向放大率之间的关系	44
2.3.5 角放大率	45
2.4 全息光学元件的基点	45
2.4.1 焦点和焦平面	46
2.4.2 主点和主平面	48
2.4.3 节点和节平面	48
2.4.4 全息光学系统理想成像作图法	50
2.5 全息光学元件的成像性质	51

2.6	薄光栅分解	55
2.7	全息光学元件的传递函数	58
2.8	全息光学元件的衍射效率	59
2.8.1	定义	59
2.8.2	透射全息光学元件的衍射效率	61
2.8.3	反射吸收全息光学元件的衍射效率	63
2.9	全息光学元件的消色差	64
2.9.1	横向色差的补偿	65
2.9.2	纵向色差的补偿	67
2.10	低像差和高衍射效率	70
2.11	全息光学反射镜	72
	参考文献	74
第3章	全息光学设计的基础理论	77
3.1	Welford 的矢量分析理论	78
3.2	全息光学设计中的坐标变换	81
3.3	全息光学设计中的光线追迹	82
3.3.1	全息光线追迹的一般形式	83
3.3.2	全息傅里叶变换透镜的光线追迹	85
3.3.3	全息显微系统的光线追迹	89
3.4	K 矢量闭合分析法	91
3.5	全息光学元件的递归设计法	94
3.5.1	递归设计的基本概念	94
3.5.2	递归设计的基本分析	96
3.6	等效透镜设计方法	98
3.6.1	基本概念	99
3.6.2	Lukosz 设计方法	102
3.6.3	Fred 设计方法	107
3.6.4	Sweatt 设计方法	108
3.6.5	Chen 设计方法	115
3.7	均方差优化方法	120
3.7.1	最小均方差的概念	121
3.7.2	最佳光栅函数	121
3.7.3	光栅函数的近似解	122
3.7.4	设计举例	123
	参考文献	124
第4章	全息光学系统的设计	127
4.1	全息光束成形透镜的设计	127
4.1.1	以静态相位近似表达式为基础的设计方法	129
4.1.2	以迭代傅里叶变换算法为基础的设计方法	130

4.2	激光扫描仪中全息光学系统的设计	132
4.3	全息 $f\theta$ 透镜的设计	136
4.4	厚全息光学元件的设计	139
4.5	准直全息光学元件的设计	141
4.6	红外全息光学元件的设计	143
4.7	非球面全息光学元件的设计	145
4.8	多端面全息光学元件的设计	150
4.9	层叠式全息光学元件的设计	154
4.10	无像差全息光学元件的设计	155
4.11	其他类型全息光学元件的设计	157
4.11.1	全息柱面透镜	158
4.11.2	多焦全息光学透镜	158
	参考文献	158
第5章 全息光学元件的像差		161
5.1	像差概述	163
5.2	全息光学元件的初级像差	166
5.3	全息光学元件的高级像差	170
5.4	曲面基板全息光学元件的像差系数	174
5.5	波长位移像差	178
5.6	消色差全息光学系统的二级色差	180
5.7	像差补偿与平衡	184
5.8	无球差记录和衍射效率之间的关系	188
	参考文献	189
第6章 计算全息光学元件		191
6.1	计算全息光学元件编码技术	195
6.1.1	概述	195
6.1.2	计算全息光学元件的基本性能	197
6.1.3	编码方法分析	198
6.1.4	迭代编码方法	203
6.2	计算全息光学元件的制造加工	206
6.3	非球面计算全息光学元件	212
6.4	子波变换和计算全息术	217
6.4.1	光学子波变换	217
6.4.2	基本的子波函数	218
6.4.3	应用于全息分析中的子波变换	219
6.4.4	计算全息元件的光学子波变换	220
6.4.5	CGH 和 JTC 子波变换	221
6.5	二元光学	223
6.5.1	二元光学混合目镜	225

6.5.2 二元光学混合微光物镜	227
6.5.3 二元光学混合摄影物镜	228
参考文献	230
第7章 全息光学元件的记录材料	233
7.1 理想的全息记录介质	233
7.2 全息记录材料的分类	236
7.3 卤化银乳胶	239
7.3.1 材料的非线性	242
7.3.2 噪声光栅	245
7.3.3 调制的非线性	246
7.3.4 波长和角度选择性	248
7.3.5 调制传递函数	249
7.4 重铬酸盐明胶 (DCG)	252
7.4.1 概述	252
7.4.2 DCG 全息元件的形成机理	255
7.4.3 动态吸收	257
7.4.4 曝光特性	258
7.4.5 环境稳定性	260
7.4.6 红光敏感性	260
7.5 光致抗蚀剂乳胶	262
7.5.1 光致抗蚀剂全息底版的非线性	263
7.5.2 光致抗蚀剂的灵敏度	263
7.5.3 光致抗蚀剂底版的处理工艺	264
7.5.4 改善光致抗蚀剂记录方法的一些建议	265
7.6 记录红外全息透镜的塑料材料	266
7.7 有机全息记录材料	268
参考文献	271
第8章 全息光学元件的记录技术	274
8.1 记录全息光学元件的基本步骤	274
8.2 记录全息光学元件的主要设备	277
8.2.1 光学平台	277
8.2.2 记录光源	278
8.2.3 记录光学系统	280
8.3 卤化银全息光学元件的处理工艺	285
8.3.1 Agfa-Gevaert 乳胶和 Kodak 乳胶	286
8.3.2 卤化银底版的漂白	289
8.3.3 提高衍射效率的一些尝试	291
8.4 重铬酸盐明胶全息光学元件的处理工艺	296
8.4.1 DCG 底版的制作	297

8.4.2	使用硬化 DCG 全息底版的处理程序	302
8.4.3	提高亚甲兰敏化重铬酸盐明胶灵敏度的方法	304
8.5	全息光学元件记录过程中的细节问题	305
8.5.1	折射率匹配箱	306
8.5.2	杂散光的遮拦	306
8.5.3	光学基板	306
8.5.4	记录光束比	307
8.5.5	调制度控制	308
8.5.6	乳胶的厚度	308
8.5.7	高斯激光光束	308
8.5.8	偏振的考虑	311
8.5.9	产生均匀激光束的吸收透镜	311
8.5.10	利用环境湿度控制再现成像波长	313
	参考文献	314
第 9 章	全息平视显示器	317
9.1	普通的平视显示器 (HUD)	317
9.2	连续透镜的概念	320
9.3	平面全息平视显示器	324
9.4	曲面全息平视显示器	329
9.5	低畸变全息平视显示器	337
9.5.1	非球面全息组合玻璃记录图形的分析	338
9.5.2	非球面全息组合玻璃	339
9.5.3	平视显示器光学系统的设计	341
9.5.4	系统的性能	345
9.5.5	记录光束的实现	346
9.6	低空红外导航/瞄准全息平视显示器	347
9.7	全息头盔显示/瞄准器	348
	参考文献	353
第 10 章	全息扫描装置	354
10.1	全息激光扫描器的基本概念	356
10.2	二维全息扫描器	359
10.3	全息条形码扫描器	364
10.4	全息 CD 光学扫描头	368
10.5	激光打印全息扫描器	371
	参考文献	375
第 11 章	全息光学元件的其他应用	377
11.1	全息光束成形镜	377
11.2	全息室内无绳红外通讯接收系统	380
11.3	校正玻璃透镜像差	382

11.4	信用卡全息扫描仪	383
11.5	全息机械加工仪	384
11.6	多重成像全息光学元件	385
11.7	全息四分之一波带片	386
11.8	全息光学测量系统	388
11.9	变空间全息光学元件	392
11.10	全息资料阅读仪	393
11.11	全息地图仪	395
11.12	全息激光保护眼镜	396
11.13	无透镜半导体激光器 MSF-HOE 校正器	399
11.14	小型全息数据处理器	400
11.15	全息光学互连器	401
11.16	全息照相机	404
11.17	医用全息内窥诊断显示器	405
11.18	全息自动防伪检查仪	406
11.19	全息望远镜	408
11.20	全息导弹制导系统	410
11.21	全息径向剪切干涉仪	411
11.22	全息干涉显微术	413
11.23	全息光纤耦合器	416
11.24	空间光调制器缺陷消除	418
11.25	全息波分复技术	420
11.26	全息多普勒速率计	421
11.27	全息匹配滤波光学处理器	423
11.28	全息多层视窗	424
11.29	全息面形测量仪	425
11.30	全息电影	427
11.31	全息体视投影仪	429
11.32	全息法布里-珀罗标准具	430
11.33	晶体生长速率全息监视仪	431
11.34	紫外全息聚光镜	432
11.35	超级并行全息光学相关器	434
	参考文献	435
第 12 章 全息光学设计软件		441
12.1	全息光学元件成像的矢量分析	442
12.2	偏心倾斜元件的光线追迹	444
12.3	光学设计软件 CODEV	445
12.4	光学设计软件 GOLD	452
12.5	其他光学设计软件	454
	参考文献	455

绪 论

1948年,丹尼斯·盖伯(Dennis Gabor: 1900—1979)博士在英国伦敦帝国科技工学院工作时,为了降低电子显微镜的像差,提高和改进图像的分辨率,采用很短波长的电磁谱线(例如X射线)存储下被测物体的图像,然后再用长波长的电磁谱线使其再现。在这个研究过程中,记录下了第一个全息图,发明了全息术。尽管这种原始的全息图没有用电子波证明其原理,但用可见光证实了其正确性,并且发表了《再现波前成像》一文。丹尼斯·盖伯全息图的制造遇到了两个困难:一是没有足够强的相干辐射光源,因而无法存储三维物体,成像质量比较差;另一个是共轴记录技术形成的“孪生像”无法分别被观察和显示。

尽管在当时的条件下研究全息术有许多困难,但是,仍然有众多研究者开展这项研究工作: Haine 和 Dyson 沿着盖伯的方向继续研究全息技术在电子显微镜中的应用,并提出了修正方案^[1]; Rogers 将全息技术扩展到无线电波长的范围^[2],建议作为分析电离层移动记录的新方法。在此后的十年中,从表面上看,全息技术寂静无声,但是研究并没有停止。Lohmann 把通讯的理念和思想引入到全息术中^[3], Leith 等人将全息理论应用到雷达研究领域,重新审视该项重要发明,并且利用全息学原理,在照相胶片上记录下雷达系统的回波,当用一束相干光照明该透明胶片时,就会出现雷达波场的光学再现图像^[4]。

激光器发明之前,全息技术没有,也不可能得到实际应用,但是,丹尼斯·盖伯首先认识到(包括后来的研究者 Leith 及 Upatnieks 等)并向人们揭示了光学相干现象的巨大潜力,因此,科学界对这项发明给予了非常高的评价,在1971年,该项发明获得了物理学诺贝尔奖。

全息术的发展可以分为三个阶段:第一阶段,从盖伯发明全息术到激光器的发明,这是全息技术的初始发展阶段,其特征是以水银灯作为记录光源,采用普通的照相底片记录共轴全息图。由于没有相干光源,全息图的再现图像的质量非常差,共轴全息图固有的“孪生像”也无法分离。1960年,激光器的发明对全息术的发展是一个极大的推动,再次引起了人们对全息技术的研究兴趣,进入了全息术发展的第二阶段。Denisjuk^[5]和 Leith 及 Upatnieks^[6]使用激光光束完成了与盖伯相类似的实验,成功地制造出能够再现三维物体的全息图,从实践上证明了全息术的可应用性。前者是可见(激光)光谱范围内的透射全息图,后者是白光反射全息图。所以说,激光器的发明是促进全息技术发展的重要原因。在这个阶段,主要表现为三个特征:①以激光器作为相干照明光源;②Leith 和 Upatnieks 改进了盖伯的共轴记录方式,采用离轴的记录方式,消除了“孪生像”,使不同衍射级的图像分离

开^[4,7]，在系统中采用空间匹配滤波器消除杂散光，这些改进对全息技术进入实用阶段起着重要作用^[8]；③高分辨率和高灵敏度记录材料开始使用，例如，卤化银乳胶和重铬酸盐明胶，其他种类的记录材料也开始研究^[9]。这一阶段的大量工作不仅使全息术重焕生机，而且还奠定了应用通讯理论解决全息光学问题的基础。20世纪70年代，全息术的研究进入第三阶段，开始了全息术辉煌发展的时期，全息术的研究领域越来越广泛，研究成果愈加丰富，典型例子就是激光记录白光再现的全息术和计算全息术的研究和开发，机载全息平视显示器和全息扫描装置的实际应用等。

全息图（Hologram）一词来源于希腊语中两个单词“holos”和“gramme”的组合，前一个单词的含义是“整个”或者“完整”，后一个单词是“信息”或“书信”，因此，全息图的含义就是包含有物体的全部信息被记录下或再现出物体所含有的相位和振幅的全部信息。

确切地说，光学全息术是两步成像技术：第一步利用干涉的方法将物体的全部信息（相位和振幅）记录下来（或“存储”起来）；第二步利用光学衍射的方法将物体的全部信息再现出来（或“释放”出来）。全息图的记录过程可以简单地描述如下：激光光源发出的相干光束被一个分束镜分成两束，一束照射到被记录的物体上，经物体反射（或者透射）后，传播到全息记录底版上，这束光被称为“物体记录光束”，另一束光不经过任何调制直接传播到全息底版，这束光被称为“参考记录光束”。由于两束光有非常高的光学相干性，因此，会按照一定规律在全息底版上形成比较复杂的干涉条纹，即干涉图。全息底版上涂镀有一层非常薄的光敏乳胶，可以记录下两束光的干涉图，再经过适当的理化处理（显影、定影、干燥和密封）后，干涉图就被固定下来，就是“全息图”。由于全息图中已经包含有被编码物体的相位和振幅的信息，所以，当用一束参考光束或者其共轭光束照射全息图时，原始的物体光束或对应的共轭物体光束就被重现出来。换句话说，光学全息术包括全息图的记录技术和图像的再现技术。

用不同方法可以记录出不同的全息图：

- ① 根据记录介质的物理特性，有振幅全息图和相位全息图，或者混合型全息图；
- ② 根据全息乳胶的厚度与干涉条纹间隔的相对关系，有体全息图和面全息图；
- ③ 根据相干光波的共线特性，有离轴全息图和共轴全息图；
- ④ 根据再现过程的工作模式，有透射全息图和反射全息图；
- ⑤ 根据信号能量载波的类型，有波导全息图、声全息图等；
- ⑥ 根据全息图制造的方式，有光学全息图和计算全息图等。

普通光学元件的基本材料是玻璃，电子器件的基底材料是晶体硅，类似地，全息图和全息光学元件也需要专门的记录材料。全息记录介质分为两类：一类是需要显影的材料，另一类是无需显影，既自显影材料。早期的全息图都是记录在普通的

照相底片上，随着激光光源的发明以及光源种类的增多，对全息记录材料的需求不再局限于普通的照相底片，而对多种记录材料进行了大量的研究^[10~22]，包括重铬酸盐明胶和染色敏化重铬酸盐明胶、卤化银乳胶、光致抗蚀剂、电光晶体、光化薄膜和光化玻璃、热敏塑料、光聚合材料、非晶半导体等。

根据全息学的基本原理，全息波前的再现是对照明光的空间调制，即相位调制或者振幅调制，因此，全息记录材料有相位调制材料、振幅调制材料或者二者兼有。记录过程中，相位调制材料主要表现在乳胶的厚度调制或折射率调制；振幅调制材料主要表现在材料对光吸收的空间变化。为了记录这些信息，记录材料必须能够线性地记录、分辨全息干涉条纹，且不增加光学噪声。所以，理想的全息记录材料应当具备下面的性质：对记录波长的高灵敏性；高分辨率；低噪声；高衍射效率；线性记录特性；可擦拭性；处理工艺简单。

到目前为止，还没有一种全息记录材料能够满足上述的所有要求，使用中，经常需要做出折中选择，使主要指标满足某种具体的使用要求。

最广泛应用的全息记录材料是卤化银照相乳胶。这种材料有比较高的曝光灵敏性，并且与激光的波长范围比较匹配，有足够的分辨率；可以通过漂白工艺将振幅全息图转化为相位全息图，提高衍射效率；价格低，市面上可以随时买到；还有一个重要的优点是处理之后有非常好的环境稳定性。卤化银照相胶片在普通的照相技术中已经普遍使用，因此，大量的研究工作都是普通照相技术的延续，偏重于保证线性记录、简化处理程序、降低噪声和提高衍射效率^[23~40]。

20世纪70年代，Shankoff^[41]首次建议使用重铬酸盐明胶（DCG）作为相位全息图的记录材料，经过大量的实验和研究，对DCG全息乳胶和染色敏化重铬酸盐明胶（DSDCG）的曝光灵敏性、理化特性、环境稳定性等都有了比较深刻的认识，并且制作了各种各样的全息图和光学元件^[42~54]。重铬酸盐明胶有低的散射和吸收、高的分辨率和大的折射率调制，理论衍射效率可以达到100%。DCG记录材料的缺点是感光灵敏度较低以及对环境条件的不适应，所以大量的研究工作是提高使用波长范围内的曝光灵敏度，增大折射率调制，最终达到提高衍射效率的目的，同时，采取必要的后处理措施保证重铬酸盐全息光学元件能够满足工作环境的要求。到目前为止，DCG被认为是记录体相位全息图，尤其是记录全息光学元件和全息显示元件的最佳材料之一。

光学全息图都是通过记录两束激光光束的干涉图而制成，这种方法要求建立一套非常稳定的光学记录平台，从而保证记录光束有一个稳定的干涉角。为了某种需要（校正像差或安装空间的限制等），要求记录光束某一支光束的记录波前（例如物体记录波前）具有特定的相位变形，或者具有比较复杂的波前形状，一般来说，这种要求不可能由常规的光学元件或系统完成。另外，绝大部分全息记录材料仅仅对短波长范围的光波敏感，如果希望记录波长大于700nm的光束相干涉产生的干涉图，就很难寻找到合适的记录材料，即使有某种合适的记录材料，由于光线不可

见，目视调整、对准和记录都比较困难。

与光学全息图不同，计算全息图（CGH）不采用光学相干涉的方法记录，而是借助于计算机，按照一定的数学描述，将一个具体的、与光学全息图相对应的干涉条纹图形计算出来，然后，通过电子束装置或者光学绘图仪，绘制出干涉图形，再通过光学照相的方法缩放成所需要的尺寸。因此，计算全息图不受记录光束波长和波面形状的限制。

计算全息图定义^[55]为：根据数字计算机综合出的图形而制造的一类全息图。在制造计算全息图时，只要给出所希望成像波前的数学表达式，就可以利用计算机综合出任意的记录波前，一般来说，普通的光学记录系统很难实现这种波前。换句话说，使用计算全息的方法可以创建一个光学全息无法实现的全息图。

早在 20 世纪 60 年代，利用计算机产生全息图的概念就已经提了出来，最初的应用是解决光学检测非球面表面曲率半径问题^[56,57]。计算全息的编码技术有许多类型^[58~65]，主要有：以方格为基础的编码方法（例如，Lohmann 编码法、Lee 编码法和 Burch 编码法）、以图像为基础的编码方法、以条纹为基础的编码方法、以孔径为基础的编码方法等。计算全息图的制造步骤归纳为以下几点。

- ① 抽样或者采集。将波前信息的连续函数转换为一个离散函数。
- ② 完成傅里叶快速变换（FFT），得到波前离散函数的频率谱。
- ③ 完成编码和干涉图形的计算机输出。
- ④ 图形的光学缩放，完成光学计算全息图的制造或者直接刻蚀。

多年来，计算全息术的发展方向主要是开发新的编码方法、研制 HCG 新的加工装置以及开拓新的应用领域。

计算全息术的成熟和显示技术的进步（显示装置的高分辨率和响应时间的提高）促进了“电子全息术”的产生^[66]。这是一种新的可视媒介，可以实时地产生三维全息图像，显示出真实情景的深度感和真实感。

全息图作为一种新的艺术介质，有非常丰厚的商业价值，在教育领域也是一种非常逼真的教育工具^[67]，除此之外，在军事或者民用工业领域中，亦有广泛的应用，例如全息干涉测量技术，全息工业环境监测技术，全息无损探测技术，全息图像显示技术^[68,69]，全息图像处理 and 识别技术。全息光学元件是光学全息术在光学成像领域的一个重要应用。

从广义的角度讲，光学元件可以分为两类：寻常光学元件和异常光学元件。前者最简单的例子就是玻璃或塑料材料经切割、粗磨、抛光和镀膜等工序制成的光学透镜、反射镜和棱镜等，主要的功能是完成光的折射和反射；全息光学元件则是异常光学元件的典型例子。

在全息光学的范畴内，点光源和点光源全息图（PSH）是两个非常重要的概念。盖伯在发明了全息术之后，和 R. J. Collier 一起揭示了共轴全息图和波带片之间的对应性，并且专门研究了光学全息图^[70]。无论多么复杂的全息图或者全息光