

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

光 全 息 存 储

陶世荃 主编

陶世荃 王大勇 编著
江竹青 袁 泉

北京工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

光全息存储/陶世荃等编著.-北京:北京工业大学出版社,1998.12

ISBN 7-5639-0709-2

. 光... . 陶... . 全息照相存贮器 . TP333.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 39037 号

光 全 息 存 储

陶世荃 主编

北京工业大学出版社出版发行

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

1998 年 12 月第 1 版 1998 年 12 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 32 开本 11.75 印张 283 千字

印数: 1~1500 册

ISBN 7-5639-0709-2/T·86

定价: 24.00 元

内 容 简 介

本书为关于光全息存储技术的专著。全书共分七章，分别介绍了现行的和潜在的光存储技术；全息学的基本原理和适合于全息存储的主要全息图类型；全息存储的记录材料，其中重点分析了光折变材料的全息记录原理和特性；全息存储系统的单元器件，其中阐述了这些器件的当前发展水平及其与全息存储技术发展的关系；全息存储器的性能及其理论极限与实际限制；当前研究得比较活跃的各种复用技术和全息存储技术目前的应用系统及其应用前景。

本书理论清晰，材料系统，联系实际，可供光全息技术的研究与应用人员阅读，也适于大专院校有关专业师生参考。

序

用光学方法存储和恢复信息，古已有之。用书写文字存储的信息，就是通过眼睛这一精巧无比的光学仪器来读取的。“微雕”就是与书写相应的高密度存储方式，只有借助显微镜等光学仪器才能从这种精细的艺术品中读出存储的信息。19世纪发明的照相技术，开创了用光学手段直接存储信息的先河，而照相缩微技术在高密度信息存储领域至今仍然有着不可替代的作用。

激光器是20世纪在光学和光电子学领域中最重大的发明。光纤通信和光盘存储是光学技术的两大硕果，它们极大地变革了并且还在变革着信息的传输和存储技术。光全息术也在激光技术的推动下不断取得进展。用全息方法存储和恢复信息，脱离了传统存储的模式。它利用两个光波之间的耦合和解耦合，可以把信息存储和信息之间的比较（相关）、识别，甚至联想的功能结合起来，也就是可以把信息存储和信息处理结合起来。体全息存储技术使得信息呈分布式存储，不易丢失，这很像大脑记忆的方式，而且在一个物理通道（介质区域）中，可以通过信息编码存储多路信息。这类似于在一个通信信道中传输多路信号，可使信息存储容量和处理信息的速度大为提高。和超短脉冲技术相结合的时域全息术，还可以存储和复现物体的快速变化过程以及立体物体的层面。由于这些显著的优点，全息存储有着广阔的应用前景。在世纪之交的今天，全息存储技术的研究蓬勃兴旺，方兴未艾，并取得可观的进展，也就不奇怪了。当然，全息存储技术在走向实用化进程中还有许多研究工作要做，还有许多问题要解决，其中的关键之一是存储材料的性能在很多场合还不够理想，需要进一步

突破。

本书作者都是北京工业大学的中青年教师。他们致力于全息存储技术的研究，并且广泛学习和总结国内外在这一领域中的研究成果，编写了这本书，承国家科学技术出版基金的资助得以出版。相信本书对于读者了解全息存储的原理和技术、应用前景和国内外的发 展态势将有所裨益。

中国科学院院士

中国工程院院士

1998 年 8 月

前 言

随着当代信息技术的飞速发展，信息的大规模存储、传输和处理一直是技术研究的热点。在信息存储方面，全息存储具有其独特的优点，因而应用前景广阔，近 10 余年来在国际上研究得十分活跃，进展迅速。研究表明，全息存储器不仅容量大，而且数据传输速率高，寻址时间短，比其它任何一种同时具有这些优点的信息存储技术更接近实用化阶段。目前，大规模全息存储技术正面临着实用化的重大突破。

近年来，我国科技工作者急起直追，已经从较高的起点进入了这一研究领域，并取得了许多高水平的成果。也有越来越多的科技工作者、管理工作者和决策人员关注这一研究热点，迫切希望了解全息存储的原理、技术和应用前景。此外，全息学作为光学和光学工程课程的一部分，已成为大专院校应用物理、信号处理、测量技术等专业的教学内容，广大师生迫切希望了解这一领域的前沿动态和最新发展。为了适应科技发展和国内科研、生产、教学的需要，我们编著了此书。本书力求理论清晰、材料全面、联系实际，不仅给读者介绍这一活跃领域的发展全貌和前沿趋势，而且为读者提供尽可能丰富的参考文献。

全书共分七章。第一章简要介绍现行的光存储技术和潜在的光存储技术，指出全息存储在各种存储技术中的地位；第二章介绍全息学的基本原理和适合于全息存储的主要全息图类型；第三章介绍全息存储的记录材料，其中以主要篇幅介绍光折变材料的全息记录原理和特性；第四章介绍全息存储系统的单元器件，阐述这些器件的当前发展水平及其与全息存储技术发展的关系；第

五章深入地介绍全息存储器的性能及其理论极限与实际限制，并给出一些实验结果；第六章介绍当前研究得比较活跃的各种复用技术，分析它们的特点和优点；最后在第七章举例介绍了全息存储技术目前的应用系统，并展望其应用前景。本书由陶世荃撰写第一章、第六章及第七章的7.3节；袁泉撰写第二章；江竹青撰写第三章及第五章的5.1节和5.2节；王大勇撰写第四章、第五章的5.3节至5.5节和第七章的7.1节和7.2节。参加本书编写、整理、校核和插图绘制等工作的还有唐斌、李宝胜、宋雪华、周雁、张惠军等。全书由陶世荃定稿。

在本书写作和成书过程中，曾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，母国光、徐大雄、于美文、李育林、戎霭伦、徐敏等在定稿前分别审阅并修改了部分样章，我国光学界前辈王大珩先生还特意为本书作序，在此表示衷心的感谢。由于有国家科学技术学术著作出版基金的资助，本书才能够撰著成书并获出版，对此深表谢意。

本书包括的范围较广，涉及的专业内容较新，由于作者水平有限，书中的问题在所难免，我们热诚地希望读者给予批评指正。

作 者

1998年7月

目 录

| | |
|----------------------------|--------|
| 第一章 信息与光学信息存储 | (1) |
| 1.1 信息与信息存储 | (1) |
| 1.1.1 信息的量化 | (1) |
| 1.1.2 信息存储的一般要求 | (2) |
| 1.2 光学信息存储的一般特点 | (4) |
| 1.3 光学信息存储技术简介 | (6) |
| 1.3.1 光盘存储 | (7) |
| 1.3.2 双光子光学存储 | (21) |
| 1.3.3 持续光谱烧孔光学存储 | (27) |
| 1.3.4 光全息存储 | (31) |
| 第二章 全息存储的基本原理 | (38) |
| 2.1 全息图的基本描述 | (39) |
| 2.1.1 全息图的记录与再现 | (39) |
| 2.1.2 全息图的分类 | (41) |
| 2.2 菲涅耳全息图 | (44) |
| 2.2.1 离轴菲涅耳全息图 | (45) |
| 2.2.2 像质分析 | (46) |
| 2.2.3 菲涅耳全息信息存储 | (47) |
| 2.3 像面全息图 | (48) |
| 2.3.1 像面全息图的特点 | (49) |
| 2.3.2 像面全息用于全息存储 | (49) |
| 2.4 傅里叶变换全息图 | (50) |
| 2.4.1 透镜的傅里叶变换性质 | (50) |
| 2.4.2 傅里叶变换全息图的记录与再现 | (53) |

| | | |
|-------|------------------------|---------|
| 2.4.3 | 傅里叶变换全息图的性质 | (56) |
| 2.4.4 | 傅里叶变换全息存储 | (57) |
| 2.5 | 体积全息图 | (58) |
| 2.5.1 | 体光栅与布拉格衍射 | (58) |
| 2.5.2 | 耦合波理论 | (61) |
| 2.5.3 | 角度和波长的选择性 | (66) |
| 2.5.4 | 大容量体全息存储 | (75) |
| 第三章 | 全息存储的记录材料 | (76) |
| 3.1 | 全息存储材料的性能 | (76) |
| 3.2 | 平面全息的记录材料 | (79) |
| 3.2.1 | 银盐材料 | (79) |
| 3.2.2 | 光致抗蚀剂 | (82) |
| 3.2.3 | 光导热塑材料 | (84) |
| 3.3 | 体全息记录材料 | (85) |
| 3.3.1 | 重铬酸盐明胶 | (85) |
| 3.3.2 | 光致聚合物 | (88) |
| 3.3.3 | 光致变色材料 | (90) |
| 3.4 | 光折变材料的全息存储机理与特性 | (92) |
| 3.4.1 | 光折变效应及折射率光栅的建立 | (92) |
| 3.4.2 | 光折变晶体内的两波耦合和衍射效率 | (103) |
| 3.4.3 | 光折变晶体的全息时间常量 | (110) |
| 3.4.4 | 光折变材料的全息存储特性 | (112) |
| 第四章 | 全息存储系统的单元器件 | (121) |
| 4.1 | 激光器 | (121) |
| 4.1.1 | 激光的相干性 | (122) |
| 4.1.2 | 气体激光器 | (125) |
| 4.1.3 | 固体激光器 | (128) |
| 4.1.4 | 半导体激光器 | (133) |
| 4.2 | 组页器 | (136) |
| 4.3 | 探测器 | (146) |

| | | |
|-------|-------------------------|-------|
| 4.3.1 | 光电二极管及光电三极管阵列探测器 | (147) |
| 4.3.2 | 电荷耦合器件探测器 | (148) |
| 4.4 | 寻址器件 | (157) |
| 4.4.1 | 机械运动寻址器件 | (157) |
| 4.4.2 | 无机械运动寻址器件 | (159) |
| 4.5 | 其它单元器件 | (165) |
| 第五章 | 全息存储器的性能 | (169) |
| 5.1 | 全息存储器的容量 | (169) |
| 5.1.1 | 全息存储容量的基本概念 | (169) |
| 5.1.2 | 平面全息存储的容量估计 | (173) |
| 5.1.3 | 体全息存储容量的综合考虑 | (177) |
| 5.1.4 | 体全息存储容量的限制 | (181) |
| 5.2 | 衍射效率 | (185) |
| 5.2.1 | 平面全息图的衍射效率 | (185) |
| 5.2.2 | 体积全息图的衍射效率 | (189) |
| 5.2.3 | 光折变全息图的衍射特性 | (190) |
| 5.2.4 | 复用全息图的等衍射效率记录方法 | (202) |
| 5.3 | 再现图像的像质评价 | (215) |
| 5.3.1 | 图像质量的客观评价 | (215) |
| 5.3.2 | 噪声分析 | (217) |
| 5.3.3 | 二值化图像的信噪比和误码率 | (230) |
| 5.3.4 | 分辨率的理论极限和实验测量 | (235) |
| 5.3.5 | 灰度保真度及其测量 | (238) |
| 5.4 | 数据传输速率 | (249) |
| 5.4.1 | 数据存入速率 | (250) |
| 5.4.2 | 数据页的读取速度 | (250) |
| 5.5 | 光折变全息存储器的保存时间及其改进 | (254) |
| 5.5.1 | 补偿光栅技术 | (254) |
| 5.5.2 | 双色技术 | (258) |
| 5.5.3 | 持续刷新和弱光读出技术 | (260) |

| | | |
|-------|---------------------------------------|-------|
| 5.6 | 体全息存储器的一般性能 | (261) |
| 第六章 | 复用技术 | (264) |
| 6.1 | 空间复用技术 | (264) |
| 6.2 | 共同体积复用技术 | (266) |
| 6.2.1 | 角度复用 | (267) |
| 6.2.2 | 位相编码复用 | (278) |
| 6.2.3 | 波长复用 | (287) |
| 6.3 | 混合的全息复用技术 | (294) |
| 6.3.1 | 共同体积的混合复用: 稀疏波长-角度复用 | (295) |
| 6.3.2 | 大面积材料中的混合复用 | (298) |
| 第七章 | 全息存储的应用前景 | (308) |
| 7.1 | 数字数据的存储 | (308) |
| 7.1.1 | 全息存储关系型数据库 | (309) |
| 7.1.2 | 纠错编码 | (311) |
| 7.1.3 | 全息数字数据存储的新颖结构 | (315) |
| 7.2 | 图像的全息存储 | (318) |
| 7.2.1 | 多灰度级模拟图像存储 | (318) |
| 7.2.2 | 模式识别与相关器 | (319) |
| 7.2.3 | 关联存储器 | (323) |
| 7.3 | 三维全息存储盘 | (325) |
| 7.3.1 | 采用平面参考光的全息盘——BOHS 盘 | (326) |
| 7.3.2 | 采用球面参考光的全息盘——SAM 盘 或 Shift 盘 | (334) |
| 参考文献 | | (342) |

第一章 信息与光学信息存储

从远古的结绳记事到当代的网络计算与通信，信息存储技术总是伴随着人类社会的进步而发展。随着社会的进步及科学技术的发展，需要存储、传播、处理和利用的信息量在急剧增加。不断增大发行量的书刊报纸、与日俱增的广播电视频道、令人目不暇接的计算机互联网络，使当今时代被称为“信息爆炸的时代”，信息产业也成为当前最优先发展的产业，并对包括信息存储在内的信息科学的发展和技术的提高提出了越来越高的要求。

1.1 信息与信息存储

在人类社会，信息是指人们的思维主体所获取的有关外部客体的情况、情报、消息等，它是客观存在的。知识的获得就是对搜集的信息进行整理、分析和归纳的结果；而决策的过程就是运用信息、分析信息和处理信息的创造性思维过程。人们可以用各种记录介质把信息存储起来；可以用文字、图形、音像等各种媒体和通信手段来传播信息。信息，作为知识的重要来源和决策的重要依据，应当让尽可能多的社会成员分享，变成整个社会的财富，而信息的共享正是通过信息的存储和传播来实现的。

1.1.1 信息的量化

在日常生活中，人们将消息、情况等通称为信息；但对信息的定量描述仍然必须建立在严格的数学基础之上。在信息理论中，信息的量化单位是“位”或“比特”（bit），它与二进制数据的

“位”有密不可分的关系。这不仅是由于当代信息存储和传播通常采用二值数据编码的方式，更重要的是由对某一消息所包含的信息量的定义所决定的。

关于某消息的信息量，与此消息所指的事件的发生几率有关。事件发生的几率越高，关于发生此事件的消息所传递的信息量越少；反之亦然。因此，由报道发生某事件的消息所传递的信息量反比于此事件的发生几率。从数学上讲，如果某件事是确定的（发生几率为 1），它传递的信息为 0；如果事件不大可能发生（发生几率接近 0），它的发生就传递了大量的信息。因此，与以几率 P_A 发生的事件相联系的信息量 I_A 可以定义为 $I_A = \log(1/P_A)$ ，这样的定义能够反映消息所包含的信息量，也使得对于统计无关的事件信息量是可加的。要确定上面的定义中对数函数的底，考虑用一个数字系统来传送有关事件发生的消息。两个等几率事件 A 与 B（例如在掷硬币试验中，国徽图案的朝上与朝下），构成信息的基本单位。传送它们的状态需要一个二值脉冲或信号，所以这个信息的基本单位可以量化为 1 位 (bit)。一般而言， n 个等几率的事件中的任何一个包含 $\log_2 n$ (bit) 信息，由于每个事件的发生几率是 $P_i = 1/n$ ，关于每个消息的信息量是 $I_i = \log_2(1/P_i)$ 或 $I_i = \log_2 n$ (bit)，这正好与用二值编码表示 n 个状态所需要的位数相同^[1]。因此，本书对数字数据的位(bit)与信息量的位(bit)也不再予以区分。

1.1.2 信息存储的一般要求

信息从信息源传播到受众，是通过信道传输的。图 1.1 为信息传输的方框图。图中将“存储”作为传播通道的终端之一，即把暂时不使用的信息存储起来。实际上，已存储的信息又可作为下一轮传播的信息源。此外，在信息传输链路中，由于各个环节的速度可能不相同，还需要存储器作为中间的环节。因此，存储也可以看成是

信息传输过程中具有延时和中继功能的重要一环^[21]。人的大脑作为信息的最终归宿,据研究,其存储容量在 10^{15} bit 以上,相当于美国国家档案馆的全部馆藏量的 10 倍,迄今为止还没有任何单个存储器件能够超过人脑的存储容量。

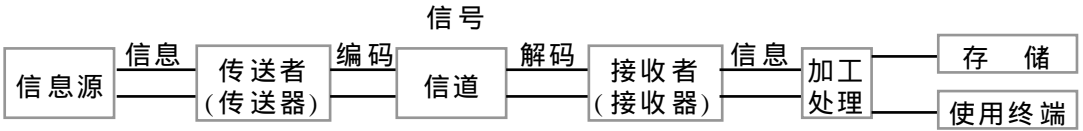


图 1.1 信息传播方框图

人们对存储器件性能的要求,首先是容量(或密度)、写(存)和读(取)数据的传输速率、存取等待时间、持久性(包括使用期和保存期)、误码率和噪声特性、符号间干扰和串扰、可否直接重写、非破坏性读出和选择性擦除、功耗和热耗散要求,等等;对于包括存储器件在内的整个存储系统,还要考虑系统可靠性(或平均损坏时间)及是否可拆卸。此外,器件和系统的成本也是不可忽视的因素。当代科学技术的发展,特别是计算技术和通信技术的发展,要求有大容量、高速度、低成本的存储器件。

在当今的计算系统中,存储器的性能与处理器相比是落后的。若把建立地址的时间包括在内,从响应最快的高速缓存器(静态随机存取存储器 SRAM)存取一次数据也要花费几个时钟周期。尤其是不可能将所有要用到的数据都保存在最容易读写的位置——处理器芯片中,因为这样做的成本太高。因此,计算机系统都采用存储器分级结构,紧靠处理器的寄存器和高速缓存器寻址最快、等待时间最短,但每兆字节容量的成本也最昂贵。芯片外的主存储器(通常是动态随机存取存储器 DRAM)较便宜,因而能做成容量更大的器件,现代的个人计算机最少装备有 8 兆字节(MB),单一芯片的容量达到 4MB 以上的器件也已实现商品化。

各种磁盘、磁带技术与相应的驱动器相结合,可以实现更大的存储容量,也称为海量存储设备。这些远离处理器的外存储器

件容量大，价格低廉，但由于它们的机械运动属性，所以存取等待时间非常长，数据传输速率很差。当前使用最广泛的外存储器件是磁盘，实际上所有的计算机系统，从台式个人计算机到大型网络系统，以及图像和多媒体系统都离不开它。典型的磁盘数据传输速率为 1 ~ 10MB/s，数据搜索时间约为 10ms，可存储 1GB 以上的数据。采用冗余低价磁盘阵列 (Redundant Array of Inexpensive Disks, RAID) 可显著改善磁盘系统的容量和数据传输性能。RAID 是大量磁盘的组合，每个盘都具有读写机构，所以可以有一定的并行性。但由于读写头定位的机械性质，并行性增加并不能改善数据搜索时间 (即在给出地址以后访问一个特定的数据段所需要的时间)^[3]。

随着社会的进步，传统的存储信息的介质 (如纸张、磁体) 已不能完全适应需要。当前的趋势是，对图像和声音的处理和通信的需求日益高涨 (即所谓“多媒体革命”)，全球计算机网络 (例如万维网) 的广泛采用，以及娱乐、教育和计算机工业的结合。据统计，1995 年，全世界对存储产品的年营业额为 1000 亿美元，单在美国就有 400 亿美元的市场。用于数字图书馆、医学成像、运动画面产生和发行，以及多媒体教育和训练等对存储器件的要求，预计在 10 年内将有 1 万亿美元存储产品市场^[4]。如此迫切的需求推动了信息存储在各个领域的研究和发展。

为了实现存储容量大、存取时间短 (速度快)、价格低廉的存储器系统，光存储技术应运而生，并迅速发展成为信息技术中的支柱产业。

1.2 光学信息存储的一般特点

人的信息来源，是通过视觉、听觉、触觉等感觉器官直接或间接从信息源获取。其中，由于视觉信息色彩纷呈，又可包含大

视场、大景深的快速运动图像，其信息丰富的程度远远超过其它的信息获取方式，使得以光为信息载体的视觉信息成为人类的主要信息来源。远古的人类就知道利用光来快速传递信息，例如我国周代（约公元前 8 世纪）就有“烽火戏诸侯”的故事；但是在很长的时期内，人们存储信息一直采用局限于直接保存包含信息的实物（如结绳计数）或符号（如各种形式的书籍文字）的方式。直到 150 多年前发明照相术，才真正进入了用光学方法存储信息的时代。

照相术是利用光诱导乳胶中物质的光化学反应，进而改变乳胶局部的颜色，从而实现信息的存储。由光学照相术发展而来的缩微照相术，即使今天在海量信息存储领域仍然具有重要的位置。这是因为缩微技术有它独特的优势：能够高保真度地存储高分辨率图像，其保持文物、古籍等物品原貌的能力无可替代。研究表明，对于照片或连续影调图像的存储，缩微方法的存储容量是光盘的 7 倍。同时，缩微片的保存寿命可达 150 年，这也是其它存储技术不能比拟的^[5]。但是这种存储技术需要复杂费时的湿法后处理，作为一种“离线”读写方式，不能像磁盘、光盘一样与现代通信设备以及计算机联机，因而在扩大信息交流方面存在限制。

当前，光学存储主要指与计算机和其它通信系统联机的海量存储技术。与传统的磁性存储技术（磁带、磁泡、磁盘）相比，光学存储有以下特点：

1) 存储密度高。理论估计，光学存储的面密度为 $1/\lambda^2$ 的数量级，其中 λ 是用于存储的光的波长。通过使用多层记录材料、分区使用记录材料的动态范围或使用多波长寻址光束及短波长照明等技术，可以使存储密度显著增大。光学方法还可以寻址记录材料的整个体积，存储的体密度可达 $1/\lambda^3$ 。按 $\lambda = 500\text{nm}$ 计算，存储密度为 $1\text{Tb}/\text{cm}^3$ 的数量级^[6]。若同时在大量可分辨的窄光谱凹陷中进行记录，存储密度还可提高 1 ~ 3 个数量级，这是当前任何其它

数据存储技术所无法匹敌的。

2) 并行程度高。由于光束可以携带图像, 即二维数据页, 通过对照明光束波面的二维调制, 光学存储器件能广泛地提供并行输入输出和数据传输。

3) 抗电磁干扰。外界电磁干扰的频率都远远低于光频, 因此光不受外界电磁场的干扰, 不同光束之间也很难互相干扰。

4) 存储寿命长。磁存储的信息一般只能保存 2~3 年。而只要光存储介质稳定, 寿命一般在 10 年以上。

5) 非接触式读/写信息。用光束读写, 不会磨损和划伤存储体, 这不仅延长了存储寿命, 而且使存储体可以自由拆卸、移动和更换, 对于当前已经商品化的光学存储设备, 例如 CD-ROM 和连接光盘系统, 这种可移动性是一大优点, 因为可以做成真正的海量存储器。而高密度的磁盘机, 由于磁头飞行高度只有几微米, 使磁盘一经固定便难以更换。当然, 随着互连网络变得无处不在, 容易通过便携计算机进行远程连接, 这种可拆卸的优越性会渐渐消失, 长远看来更重要的是发展高速大容量的稳定存储系统^[21]; 而光学存储也最有希望提供这样的系统。

6) 信息价格位低。由于光学存储密度高, 其信息价格位可比磁记录低几十倍。

由于上述这些优点, 所以自从激光器发明以来, 光学存储技术就一直受到人们的关注。

1.3 光学信息存储技术简介

从原理上讲, 只要材料的某种性质对光敏感, 在被信息调制过的光束照射下, 能产生物理性质的改变, 并且这种改变能在随后的读出过程中使读出光的性质发生变化, 都可以作为光学存储的介质。光学存储按存储介质的厚度可分为面存储(二维存储)和