

全息存储 —下一代存储解决方案*

李 伟, 谢长生, 裴先登

(华中科技大学 计算机学院外存储系统国家专业实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在过去的十几年中,人们对大容量和高速传率的追求不断升级,特别是随着网络和多媒体技术的广泛应用,这种需求更是急剧膨胀。对大容量、高速传率和短存取时间的永无休止的需求,促进了各种数据存储技术的发展。二维存储技术,如磁存储、传统光盘存储和半导体存储等仍在不断地改进以满足对存储系统更大和更快等要求,然而这些存储手段正逐步接近其物理极限。目前正在迅速发展的一种有别于传统技术的方法就是三维存储技术,如全息存储等。全息存储技术以其存储密度和数据读出率高及相关内容寻址等特点极有可能成为下一代的存储解决方案。但由于缺乏合适的存储材料及实用部件,全息存储器的实用化进程较为迟缓。近年来,用于全息存储系统的实用组件的极大发展,再一次引起了研究人员对这一技术的兴趣,实用化的全息存储器呼之欲出,更加巩固了全息存储下一代存储解决方案的地位。

关键词: 全息数据存储; DMD; CMOS APS; 存储材料

中图法分类号: TP333.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3695(2002)04-0014-03

Holographic Storage —The Storage Solution of Next-generation

LI Wei, XIE Chang sheng, PEI Xian deng

(National Lab. of Storage System, College of Computer Science & Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: The requirements for storage capacity and fast transfer rate have increased dramatically in the past decade, and are exploding especially with the popularity of the internet and multimedia. Our needs for high capacity, fast transfer rate, and short access time appear to be insatiable. Optics and the basic principles of holography are a particularly attractive way to meet these requirements and may well represent the storage solution of the future. But the realization of holographic storage has been frustrated by the lack of availability of suitable system components, and perhaps most importantly, by the absence of recording materials that satisfied the stringent requirements of holographic storage. Recently the development of practical components for holographic systems removes many of the obstacles that previously prevented the practical consideration of holographic storage and greatly enhances the prospects for holography to become a next-generation storage technology. A practically realizable, high capacity holographic storage system with fast transfer rates and low-cost, removable recording media is vividly portrayed.

Key words: Holographic Storage; DMD; CMOS APS; Recording Materials

1 引言

在过去的十几年中,人们对大容量和高速传率的追求不断升级,特别是随着网络和多媒体技术的广泛应用,这种需求更是急剧膨胀。对大容量、高速传率和短存取时间的永无休止的需求,促进了各种数据存储技术的发展。二维存储技术,如磁存储、传统光盘存储和半导体存储等仍在不断地改进以满足对存储系统更大和更快等要求,然而这些存储手段正逐步接近其物理极限。目前正在迅速发展的一种有别于传统技术的方法就是三维存储技术,如全息存储等。光学及全息存储的基本原理使全息存储技术成为满足所有这些要求的最有吸引力的技术,极有可能成为下一代的存储解决方案^[1~4]。

图1是一个典型的4f(the Four Focal Length)全息存储系统。存储时,一个二维的振幅型空间光调制器SLM(Spatial Light Modulator),以二维的'0'和'1'所组成的二值数据页代表欲存储的信息。一束激光通过SLM携带存储信息与参考光在记录介质中发生干涉形成全息图并被记录下来。数据的读出对参考光的特性十分敏感,通过改变参考光,例如参考光的入射角或波长,就能在同一存储体内存储许多不同的数据页。通过使用这种复用技术,可以增加存储密度,显著提高整体存储容量,这正是全息存储区别于传统存储技术之处。所存全息图的数目与记录材料的厚度及特性有关。读出时,用与读出图像相对应的参考光照射全息记录介质,衍射光成像于探测器阵列表面,探测器阵列根据各像素所接收到的光强大小将光信号转变为电信号。在全息存储技术中,数据按“页面”方式并行读写,与传统存储技术中按“位”操作的串行方式显著不同。以页为单位存储和利用内在的并行性恢复数据,读出数据率可超过1GB/s,而

收稿日期: 2001-04-11

基金项目: 国家“973”重大基础研究项目(GI999033006)



仅仅受到 I/O 设备(SLM、探测器阵列)和电子通道的限制^[5]。

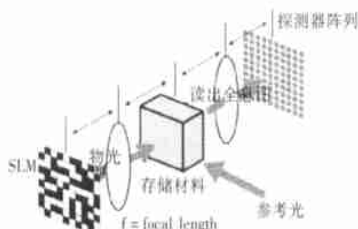


图1 典型的4-f全息存储系统示意图

磁和传统光盘存储主要以一个技术为基础,而全息存储不仅仅依赖于全息术,全息存储系统主要的组成部分来自不同的领域,包括激光、空间光调制器、探测器阵列、偏转、变换光学、材料科学等等。

图2所示只是全息存储系统的部分组件。另外还有复杂的光学系统、访问其它存储体的机械运动部件、控制系统的电子设备和实现编解码处理的存储通道等。



图2 全息存储系统组成

在全息存储系统组成中,重要的有光源、输入部件(SLM)、存储材料和读出部件(探测器阵列),它们的性能是影响全息存储系统性能的主要因素。

2 全息存储器的实用化进程

从20世纪60年代初,全息数据存储的概念被提出以来,三次研究热潮逐步将全息存储推向实用化。

2.1 第一次研究热潮

40年代末,Dennis Gabor发明了全息术,并将其应用于X光图像的放大处理^[6]。60年代初,激光的出现使全息术应用于图像的存储和读出成为可能,此时Van Heerden提出了全息数据存储的概念^[7],掀起了全息存储的第一次研究热潮。早在70年代,人们就已设计出许多有潜力的全息存储系统。鉴于当时缺乏合适的存储材料及实用部件,全息存储器的实用化进程较为迟缓。

而存储工业以外的电子消费、医学、娱乐工业促进了全息存储系统所需的低廉、可靠且实用部件的极大发展,引发了全息存储的后两次研究热潮。

2.2 第二次研究热潮

1995年,随着新型优良全息记录材料,如光折变晶体及光敏聚合物等的研制,以及相关光电子元器件,如作为SLM的高密度高速率液晶显示器(LCD)和作为探测器阵列的CCD光电探测阵列制造技术的进步,使全息存储再次成为研究热点。但由于LCD和CCD的性能不够满意,更重要的是缺乏满足全息数据存储严格要求的存储材料,经过几年的发展,仅有一些有限性能的全息存

储演示系统出现,而这些系统不能同时达到大存储容量、高速传率、短存取时间的要求,体积也不够小。全息数据存储的实用化进程再次受阻。

2.3 第三次研究热潮

自1999年以来,用于全息存储系统的实用组件的极大发展,再一次引起了研究人员对这一技术的兴趣,实用化的全息存储器呼之欲出。

(1)光源。用于全息存储系统的光源必须具有高度的空间和时间相干性以便在要求的空间(例如整个存储体内)形成干涉图样,并在曝光时间内保持干涉图样的稳定。总的说来,用于全息存储的激光必须要有足够的功率(通常几百毫瓦);要足够小,而且要便宜。

用于医学、有线电视和印刷工业的Nd:YAG二极管泵浦倍频绿激光器,由于体积小、坚固和低廉,使其具有用作全息记录光源的极大潜力。但对激光的最后选择依赖于存储材料的波长敏感性。

(2)DMD。全息存储系统中的空间光调制器需要高对比度和能在开关状态间进行快速转换,才能达到高信噪比和高速传率,并且像素要多,以提高存储容量。

目前,无论是计算机还是电视机,基本都使用阴极射线管(CRT)显示器;现在液晶显示器(LCD)也已进入计算机和电视机领域,主要用在笔记本电脑和便携式电视机。随着大屏幕、高清晰度电视的发展,CRT和LCD越来越不能适应新的要求,一种基于数字微镜(Digital Micro-mirror Device,DMD)的数字光路处理技术(Digital Light Processing,DLP)已经用于制造大屏幕显示器(32英寸)和多媒体投影机。DMD像素多(1 Million)、帧频快(2000 Hz)和光学对比度高,是可用于全息存储的理想的空间光调制器。

DMD器件是由数十万甚至数百万个极其微小的铝镜子构成的,一个微镜对应于一个像素,面积仅为 $16\mu\text{m} \times 16\mu\text{m}$ 。一个DMD器件是一块带有窗口的CMOS集成电路,尺寸为 $37\text{mm} \times 22\text{mm}$ 。微镜安放在一个半导体存储器上,每片微镜都装有活动铰键,可以作 $\pm 10^\circ$ 的旋转,微镜不工作时处于0位置,当加上“1”信号时,微镜转到 $+10^\circ$ 位置,“0”信号时,转到 -10° 。来自光源的平行光线照射到微镜上, $+10^\circ$ 位置时光线经微镜反射到投影透镜系统,然后投射到屏幕上。当微镜处于 -10° 位置时,光线被反射到另一方向,由吸收装置吸收,实际上微镜起到了“开关”光线的作用,其开关速率可以达到每秒1000次。微镜与微镜之间的间隙仅 $1\mu\text{m}$,所以反光面积达到90%,最好的LCD反光面积只有70%。微镜的反射效率 $> 60\%$,而LCD是依靠极化,只有50%的发光效率。所以基于DMD的DLP投影机所提供的影像与胶片放映一样非常细腻,看不出接缝。现在的DMD器件主要有3种阵列:480000(SVGA 800×600),786000(XGA 1024×768),1310000(SXGA 1280×1024)。现在已经做成2300000(2048×1152)的DMD。

(3)CMOS APS(Active Pixel Sensor)。全息存储通道的另一端是探测器阵列,它接收读出的图像并产生电信号进入取阈、纠错和解调电路。探测器阵列有许多设计参数直接影响整个全息存储系统的结构,这些参数包括:

对特定波长的量子效应、单个探测器元件的数量、尺寸和数据率。

自从 70 年代贝尔实验室首次开发出 CCD 以来,影像公司不断地发展并改进这一技术。CCD 能提供好的图像质量,但是昂贵、功耗大,而且由于需要辅助芯片而使体积变大。认识到 CCD 的这些不足和人们对轻便成像系统的不断追求,特别是星际航天器应用的要求,NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) 开始研制第二代固态图像传感器技术。1992 年下半年制造出了互补金属氧化物半导体有源像素传感器(CMOS APS)。通过固化函数和更加有效地读取图像,APS 耗电量是 CCD 的 1%,体积比 CCD 减小 10%,并且加工方便、价格便宜,不易受辐射影响。虽然 APS 在信噪比、灵敏性、图像均匀性等方面还不能同最好的 CCD 相比,但 APS 却具有全息存储所要求的短存取时间和高速传率等特性,因而,对于研制小型、高速、实用的全息存储器,APS 是全息存储器中探测器阵列比较理想的选择。Photobit 公司生产的 APS 见图 3。



图 3 Photobit 公司生产的 APS

(4) 材料。全息存储技术的存储容量、存储和读出速率、器件的简捷性、存储数据的稳定性以及用户误码率等所有这些特性在很大程度上都受到存储材料性能的限制^[8]。必须要在可利用的材料及最优性能间进行折衷。所以在全息存储器的实用化进程中,研制合适的存储材料是较大的挑战之一。

全息记录介质要有高的动态范围、高光敏性、形稳性、光学透明度、均匀性、非破坏性读出、厘米级厚度,以及环境和热稳定性。全息存储材料的光学质量、存储性能及稳定性直接影响到存储密度、容量、读出数据率和误码率。材料的存储性能用光敏性和动态范围来衡量。材料的动态范围是指在材料同一体积中存储很多全息图时材料的整体反应。动态范围对容量的影响非常大。在同一材料空间里,写入数据页时,会使以前存储的所有信息页变得不清晰,因为它们必须共享材料有限的动态区。换句话说,只有在材料的动态范围内,才能写入另外的全息图,否则,图像会变得模糊不清,以致读出时出错。正是由于这一点限制了材料的存储能力。

在材料方面取得的重大进展来自贝尔实验室,他们已研制出一种新型的“双化学”光敏聚合物,具有厘米级厚度且具有反应快、高光敏性、光学均匀性等特性,是目前具有最高动态范围的全息存储材料,是少数几种适用于高密度全息数据存储应用的存储材料之一。

3 结论

有了合适的存储材料、光源、输入及读出部件,生产大容量、快速传率、低廉且介质可换的实用化全息存储器已成为可能,更加巩固了全息存储下一代存储解决方案的地位。2001 年,朗讯接受三家风险投资公司 Signal

Lake, Madison Dearborn Partners and Newton Technology Partners,以及 Imation 的投资,在贝尔实验室开发高性能的全息存储材料及系统。预计他们的第一代产品以全息盘的形式出现,如图 4。每张 5.25 英寸的盘,容量为 125GB,是 DVD 单盘容量(4.7 gigabyte)的 27 倍,速传率比 DVD 的(7.5~15MB/s)快 25 倍^[9]。

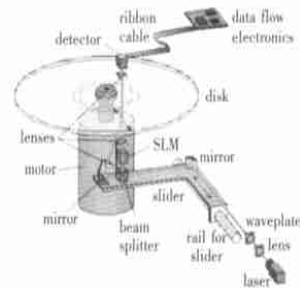


图 4 全息光盘

参考文献:

- [1] J F Heanue, M M Bashaw, L Hesselink. Volume Holographic Storage and Retrieval of Digital Data [J]. Science, 1994, 265 (5): 749-752.
- [2] J F Hong, I McMichael, T Y Chang, et al. Volume Holographic Memory Systems: Techniques and Architectures [J]. Opt. Eng. 1995, 34: 2193-2203.
- [3] Ashley, M-P Bernal, G W Burr, et al. Holographic Data Storage [J]. IBM Journal of Research and Development, 2000, 44 (3): 341-368.
- [4] D Psaltis, G W Burr. Holographic Data Storage [J]. IEEE Computer, 1998, 31(2): 52-60.
- [5] Glenn T Sincerbox. Holographic Storage: Are We there Yet? [EB/OL]. available from world wide web site, <http://www.optics.arizona.edu/glenn/holograp1.htm>
- [6] D Gabor. A New Microscope Principle [J]. Nature, 1948, 161: 774.
- [7] P J van Heerden. Theory of Optical Information Storage in Solids [J]. Appl. 1963, 2(4): 393-400.
- [8] M-P Bernal, G W Burr, H Coufal, et al. Holographic Data Storage Materials [J]. Mater. Res. Bull, 1996, 21: 51-60.
- [9] Lucent. Imation Developing Bell Labs Holographic Storage Technology [EB/OL]. available from world wide web site. <http://www.bell-labs.com/news/1999/august/11/1.html>

作者简介:

李伟,女,博士生,讲师,现主要从事大容量存储技术的研究;谢长生,男,教授、博士生导师,计算机科学与工程系主任,“信息存储系统”教育部重点实验室主任,中国计算机学会外围设备专委会常委,系统结构专委会,多媒体专委会副秘书长,主要研究方向为采用新原理的超高密度超高速存储技术及基于网络的海量存储系统,发表论文 40 余篇,著作 1 部,获国家科技进步奖 1 项,部委一、二、三等奖 3 项,并获得国际发明金奖 1 项;裴先登,男,教授、博士生导师,1961 年毕业于莫斯科包曼高等工程学院精密机械专业,获前苏联工学副博士学位,主要从事计算机存储与测试技术的研究,现任中国计算机学会多媒体专业委员会副主任等职,在国内外发表科技论文 100 多篇,获国家各级科技奖励 10 余项。