

大数据时代的光存储技术

谭小地

(北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 概述了光存储技术的发展历史和现状, 分析了在大数据时代光盘的作用和存在的意义。面对传统光盘容量低、速度慢等问题, 介绍了能够妥善解决此问题的光盘库技术。最后介绍了可替代传统光盘的全息光存储技术。其中, 同轴全息光存储既可与传统光盘相兼容, 又可作为大数据高密度高速长期保存的解决方案。

关键词: 光学数据存储; 光存储; 大数据; 归档存储; 数据寿命

中图分类号: TP333.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0935001

Optical data storage technologies for big data era

Tan Xiaodi

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The history and status quo of optical data storage was reviewed in this paper. In big data era, the usage and meaningfulness of optical disc was discussed. Because of the low capacity and slow rate of optical disc, the effective technique solution of Optical Library was introduced. In the last the holographic data storage technologies as the next generation of optical disc were described. Collinear Holography is one of the technologies which can be compatible with existing disc storage systems, like CD and DVD, and enable us to store the Big Data with its high density, high data rate and long life time.

Key words: optical data storage; optical memory; big data; archive storage; data life time

人类已经进入大数据时代, 海量数据的低成本和超长期保存已成为目前网络信息产业领域的重大需求, 高密度长寿命光存储将在其中担任重要角色。大数据科学更依赖于全局数据, 越大、越繁杂的数据全集是各种相关性分析和知识挖掘的基石, 这就要求对于各种数据进行长期保存。高密度长寿命光存储符合国家新一代信息技术产业、新材料产业等战略新兴产业的总体要求。高密度存储符合新一代信息技术海量数据存储和低成本维护的需求; 与高密度长寿命光存储相应的存储介质将带动新材料产业的发展。

Intel 公司预测, 2015 年数据中心的存储容量与 2011 年相比扩大了 16 倍。美国国际数据公司 (IDC) 在《企业级外部存储市场季度跟踪报告》中预计, 全球数据总量将在 2020 年达到 40 ZB (ZB=10¹² B), 其中有 80% 是只保存而很少读取和利用的所谓“冷数据”, 这些数据到底有多大量, 可以通过一个简单的计算来了解。如果将这些冷数据用 1TB 的硬盘保存, 需要 320 亿个这样的硬盘, 将这些硬盘摞起来 (厚度 26 mm) 可绕地球 20 多圈。可以想象, 面对如此巨大的数据存储需求量, 在导致数据中心的存储容量需求呈指数级爆炸式增长的同时, 对提高存储密

收稿日期: 2016-08-02; 修订日期: 2016-09-04

作者简介: 谭小地 (1962-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光学工程的信息光学领域。Email: tan@bit.edu.cn

度的需求也在不断增长。

目前,数据中心存储数据的主流媒体还是基于磁技术的存储机制,其主要产品包括磁盘和磁带。这种技术不仅存在寿命有限的问题(磁盘 5 年,磁带 10 年)^[1-3],而且数据存储在磁盘表面的二维平面内,存储密度(735 Gb/in²)已经趋近于其理论技术的极限。另一方面,以闪存等为代表的固态存储技术虽然具有广泛的应用扩展空间,但是也面临存储密度(550 Gb/in²)受限的问题,而且这种技术还存在擦写次数有限和电荷流失等缺点,同样不适合冷数据的低成本长期保存。

随着存储数据量的需求不断增长,数据中心的能耗也随之大幅度增加。在 Google 公司的数据中心,其能耗费用已经超过了其维持管理费用的 50%。该公司已经开始建设自己的发电厂,利用自发电来降低电力消耗的成本。根据 McKense 公司的报告,2020 年数据中心行业将成为最大的温室气体排放者之一。因此,降低存储数据的能耗也已经成为大型数据中心经营管理的主要目标之一。

Facebook 公司对目前多种存储技术的对比研究表明:光存储在数据长期保存成本和能耗方面最具优势,并已经开始尝试利用蓝光光盘(BD, Blu-ray Disc)保存其数据中心的冷数据,实现了成本降低 50%、能耗减少到 80% 的显著效果^[4]。

光盘存储,如 CD、DVD 和 BD,是利用激光在光盘表面的局部点发生反射或不反射来实现 0 或 1 的二进制数据读取的。这个局部点的反射或不反射状态是通过改变材料的物理性质来实现的,而这种物性变化也必须通过物理的方式才能实现,即使在掉电状态下也不会发生信息丢失的现象。因此,光存储与其他存储方式相比具有节能和长期保存的优点。

光盘经历了 CD、DVD 和 BD 三代产品,其记录密度在不断地提高。提高密度的方法是靠缩小会聚到光盘上的光点尺寸实现的。如图 1 所示,三种规格的光盘的存储容量分别为 0.7、4.7、25 GB。光点(S)的直径分别为 2.11、1.32、0.58 μm。为了缩小这个光点,用于会聚光点的透镜数值孔径(NA)也越来越大,已经接近极限值(1);光波长(λ)也越来越短,已经接近紫外的边缘;为了减少会聚光点的像差,表面保护层(t)也越来越薄。可以说这种基于光盘表面二维点阵排列方式的传统光盘技术,由于光学系统

的衍射受限等原因,其存储密度(25 Gb/in²)也已趋近于理论极限。

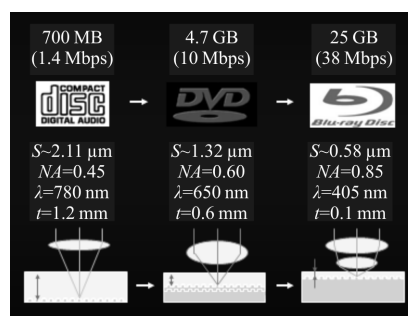


图 1 三种光盘及规格参数

Fig.1 Three kinds of optical disc and their formats and parameters

为了扩大光盘的存储容量,日本的 BD 制造企业在 BD 上继续下功夫。将 BD 的二维存储空间向厚度方向伸展,开展了一系列的研究。如索尼(Sony)和松下(Panasonic)等公司在已经向数据存储市场推出了 4 层(100 GB)和 6 层(150 GB)产品的同时,在 TDK 公司实验室里也实现了最高值可达 16 层的研究成果。相信随着多层技术的不断发展,BD 产品的存储容量也会不断得到改进和提高。

由于存在单张光盘的容量有限和光盘的读取速度还不够高等问题,将光盘应用于数据中心还必须与现有存储技术相结合,将光盘集合到一起形成所谓的“光盘库”。国内,以苏州互盟信息存储技术有限公司、华中科技大学武汉光电国家实验室为代表的研究和开发,可以妥善解决目前光盘性能低下的问题,实现大容量存储、高速率数据传送的能力。关于这部分内容的详情可参阅本栏目的该专题两篇论文:《一种新型数据存储模式:磁光阵列的设计与实现》和《一种超大容量自动光盘库的设计与实现》。

传统光盘多层技术为提高光盘的存储容量提供了可能,但随着层数的增加,也带来了读写过程中伺服控制的难度。而且各层是相互分离的,可提升的范围也是有限的。面对未来大数据存储的需求,必须进一步开发更高密度、更高数据传送速率的存储技术。

全息光存储早在 50 年前就被誉为高密度、高速率的存储方式,它是利用全息的方式将信息记录和再现的。图 2 所示为全息光存储的记录和再现过程。在记录过程(图 2(a))中,空间光调制器(SLM)将信息调制到称为“物光”(Object,也称信息光)的一束光

束中,用透镜将该光束会聚到全息媒体(Holographic media)中,并与称为“参考光”(Reference)的另一束光进行干涉,该干涉条纹就会记录在全息媒体中,随着参考光入射方向的改变,可以将不同的信息存储在全息媒体的同一个位置里,可实现高密度存储。在再现过程(图 2(b))中,当参考光按照记录时的角度入射时,根据布拉格条件,被记录的信息光就会被再现出来,该再现光经过透镜后即可还原空间光调制器的图像,实现信息的再现。这种全息存储方式通常被称为“双光束全息光存储”。

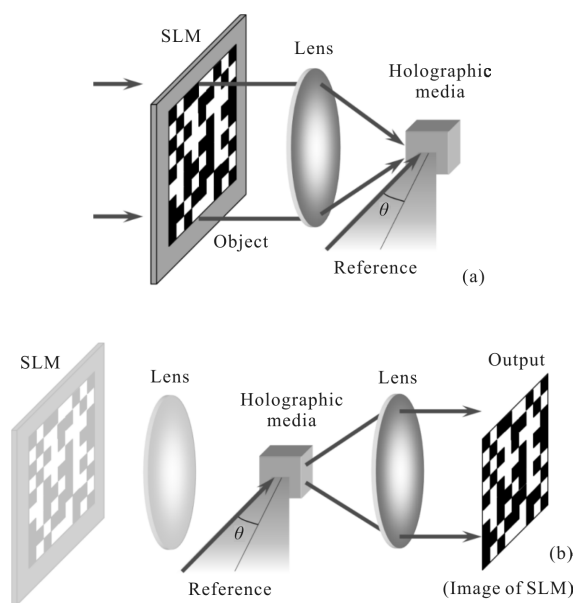


图 2 双轴全息光存储的(a)记录和(b)再现原理

Fig.2 Principle of (a) recording and (b) retrieving of the two axis holographic data storage

全息光存储的三维空间记录和二维的数据传送方式与传统光盘存储方式相比具有高密度(1 mm 厚介质的理论值:10 Tb/in²)和高速率的优势(取决于光电器件的转换速度,而非技术本身)。

全息光存储的研究从 20 世纪 60 年代就已经开始^[5],20 世纪 80~90 年代美国的国家项目也曾研究过全息光存储技术,主要的代表是美国加州理工大学^[6]、斯坦福大学^[7]的研究团队以及 IBM 公司^[8]等。当时的主要记录材料是光折变晶体,其特点是可擦写的存储,它是迄今为止仍然具有存在价值的一种全息存储材料。利用光折变晶体材料进行存储的代表工作可参阅本栏目的该专题论文“Readout Properties of Polychromatic Reconstruction”。

为了简化系统构成,提高记录密度,研究者们提出了许多记录方式,进行了各种尝试。其中神户大学的 Matoba 研究组提出了反射式的全息存储光盘和散斑复用记录方式,详细请参阅本栏目的该专题论文“Reflection-type Holographic Disk-type Memory using Three-dimensional Speckle-shift Multiplexing”。

进入 21 世纪后,以美国 Aprilis^[9]、InPhase^[10]公司为代表提出了光致聚合物(Photopolymer)作为全息光存储材料,其寿命达到 50 年。国内在全息存储领域也有一些研究成果:1999 年“光学体全息存储机理研究”、“全息存储材料研究”分别作为子课题纳入国家 973 计划,为国内全息光存储研究起到了一定的促进作用;清华大学^[11]、北京工业大学^[12]、哈尔滨工业大学^[13]、中国科学院西安光学精密机械研究所^[14]等单位都从事过全息存储的研究。

笔者曾在日本 Optware 公司工作期间提出并参与了同轴全息光存储方式的研究^[15],该方式独特之处是将信息光与参考光共轴;采用反射式全息光盘结构并放置于透镜后焦点处。这样可以很顺利地将传统光盘的伺服技术结合到全息光存储系统中,既简化了系统的光学结构,又能避免环境振动等外界因素的干扰,解决了双光束干涉方式无法克服的问题。

但是,同轴全息光存储方式在读取过程中其再现图像伴随着很大的噪声,限制了记录密度的增加,实际达到的存储密度与理论值还有很大差距^[16]。为了降低噪声,提高同轴全息光存储的记录密度,Optware 尝试了许多种方法^[17-19],效果都不太理想。其主要原因是利用振幅调制的全息记录,可调制的记录参量太少。另外,伺服技术并没有真正有效应用到系统中。

笔者曾在 Optware 公司主持开发过同轴全息光存储的技术和产品。2012 年获批中组部“千人计划”特聘专家后,全职回国,继续开展同轴全息光存储的研究,提出了相位和偏振多维调制提高全息光存储密度和数据传输率的理论与方法^[20-21]。目前已经建立起“信息光学实验室”和与日本东京大学合作的“信息光学联合实验室”。全面开展同轴全息光存储的研究,详细请参阅本栏目的该专题论文“High Density Holographic Versatile Disc(HVD) System using Collinear Technologies”。

各种存储方式及其各自的特性比较如表 1 所示。可以预见,面对大数据时代对信息存储的刚性要求,只要科研人员坚持不懈地努力,早日开发出高密

度、大容量、长寿命和节能减排的全息存储光盘,光存储技术成为数据中心的主流存储方式的年代就要到来。

表 1 各种存储方式比较

Tab.1 Comparison of data storage methods

Type name	Storage method	Life time	Data transfer	Energy consumption	Space of density
Flash memory	2-dimension	Short	1-dimension	Low	Small
Hard disk	2-dimension	Short	1-dimension	High	Small
Tape	2-dimension	Middle	1-dimension	Low	Small
Optical disc	2-dimension	Long	1-dimension	Low	Small
Holographic disc	3-dimension	Long	2-dimension	Low	Large

参考文献:

[1] Kumar S, McCaffrey T R. Engineering economics at a hard disk drive manufacturer [J]. *Technovation*, 2003, 23 (2): 749-755.

[2] Okazaki Y, Hara K, Kawashima T, et al. Estimating the archival life of metal particulate tape [J]. *Magnetics IEEE Transactions on*, 1992, 28(5): 2365-2367.

[3] Sony Corporation, Professional Solutions Group. Optical Disc Archive White Paper v1.10 [M]. Japan: Sony Corporation, 2013.

[4] Ars TECHNICA. Technology Lab/Information Technology [EB/OL]. (2014-01-01) [2016-08-02]. <http://arstechnica.com/information-technology>.

[5] Heerden P J. Theory of optical information storage in solids [J]. *Appl Opt*, 1963, 2: 393-400.

[6] Coufal H J, Psaltis D, Sincerbos G T. Holographic Data Storage[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.

[7] Hesselink L, Bashaw M C. Optical memories implemented with photorefractive media[J]. *Opt Quantum Electron*, 1993, 25: S611-S661.

[8] Bernal M P, Coufal H, Grygier R K, et al. A precision tester for studies of holographic optical storage materials and recording physics[J]. *Appl Opt*, 1996, 35: 2360-2374.

[9] Schnoes M, Ihas B, Dhar L, et al. Photopolymer use for holographic data storage[C]//SPIE, 2003, 4988: 68-76.

[10] Waldman D A, Butler C J, Raguin D H. CROP holographic storage media for optical data storage at greater than 100 bits/ μm^2 [C]//SPIE, 2003, 5216: 10-25.

[11] Cao L, He Q, Jin G, et al. Improvement to holographic digital data storage system with partially coherent light[C]//SPIE, 2004, 5557: 377-382.

[12] Zhai Q, Tao S, Zhang T, et al. Investigation on mechanism of multiple holographic recording with uniform diffraction efficiency in photopolymers [J]. *Opt Express*, 2009, 17(13): 10871-10880.

[13] Liu H, Yu D, Li X, et al. Diffusional enhancement of volume gratings as an optimized strategy for holographic memory in PQ-PMMA photopolymer [J]. *Opt Express*, 2010, 18(7): 6447-6454.

[14] Yao B, Lei M, Ren L, et al. Polarization multiplexed write-once-read-many optical data storage in bacteriorhodopsin films[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(22): 3060-3063.

[15] Horimai H, Tan X, Li J. Collinear holography[J]. *Appl Opt*, 2005, 44: 2575-2579.

[16] Tanaka K, Hara M, Tokuyama K, et al. High density recording of 270 Gbits/inch² in a coaxial holographic storage system[C]//Proceedings of ISOM, 2007: Mo-D-03.

[17] Horimai H, Tan X. High density recording storage system by collinear holography[C]//SPIE, 2006, 6187: 1-7.

[18] Horimai H, Tan X. Collinear technology for holographic versatile disk[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(5): 910-914.

[19] Ishioka K, Tanaka K, Kojima N, et al. Optical collinear holographic recording system using a blue laser and a random phase mask [C]//Proceedings of ISOM/ODS Conference, 2005.

[20] Tan X, Lin X, Wu A, et al. High density collinear holographic data storage system [J]. *Front Optoelectron*, 2014, 7(4): 443-449.

[21] Lin X, Ke J, Xiao X, et al. An effective phase modulation in the collinear holographic storage[C]//Proceedings of SPIE Photonics West, 2014, 9006: 900607.