

磁光电混合存储技术研究综述

吴晨雪^{1,2}, 胡巧¹, 赵苗¹, 苏文静¹, 郭新军^{1*}, 阮昊¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所微纳光子功能材料实验室, 上海 201800;

²浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 介绍了磁光电混合存储的技术特点及发展历程;总结了其关键技术及研究现状,包括存储系统结构、软件和硬件的关键技术以及相关标准的制定和专利申请;介绍了混合存储技术的发展动向,对磁光电混合存储的技术发展进行了展望。该综述有助于研究人员更系统、清晰、准确地认识磁光电混合存储技术,并有助于未来大数据存储的发展。

关键词 光数据存储;磁光电混合存储;数据热度;超分辨

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.070003

Review on Magnetic-Optical-Electric Hybrid Storage Technology

Wu Chenxue^{1,2}, Hu Qiao¹, Zhao Miao¹, Su Wenjing¹, Guo Xinjun^{1*}, Ruan Hao¹

¹Micro Nano Photoelectric Functional Materials Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²College of Optical Information Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract The technical characteristics and development history of magnetic-optical-electric hybrid storage are reviewed, and its key technologies and research status are summarized, including storage system structure, some key technologies of software and hardware, as well as related standard formulation and patent applications. And the development trends of hybrid storage technology are described. The future for the development of magnetic-optical-electric hybrid storage is prospected. This review will help researchers to understand magnetic-optical-electric hybrid storage more systematically, clearly and accurately, and contribute to the development of big data storage in the future.

Key words optical data storage; magnetic-optical-electric hybrid storage; heat value of data; super-resolution

OCIS codes 210.4770; 210.3810; 210.4810

1 引言

随着互联网、云计算、人工智能的飞速发展,信息数据呈指数形式爆炸性增长,人类已进入大数据时代。如何长期高效、安全可靠、绿色节能地存储这些海量数据成为现代社会面临的一个重要问题。因此,对数据存储技术进行全面、先进地创新和更新至关重要^[1]。采用单一的存储介质已难以满足大数据存储的市场需求,而以光存储为基础的磁光电混合存储技术(MOEHS)集成了磁存储、电存储和光存

储三种存储技术的优点^[2-10],可为大数据存储提供一种高读写性能、长寿命、高可靠、低运维成本的解决方案,将是下一代绿色数据中心的核心组成部分,是大数据存储的发展方向。这也与光学专家顾敏提出的未来的大数据中心将有更高速度、更大容量,而且是绿色的^[11]观点相符。

将磁光电混合存储技术用于大数据存储的思路始于 21 世纪初^[12],到目前为止,已有多种基于磁光电混合存储原理的样机研制成功并获得工程应用^[13-18],磁光电混合存储技术不断完善,正逐步实用

收稿日期: 2018-08-13; 修回日期: 2018-09-22; 录用日期: 2018-10-31

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划(16DZ1100302,16511101600,17DZ2201600)

* E-mail: 42328327@qq.com

化和商用化。本文简要回顾了磁光电混合存储的发展历史,梳理了关键技术的研究现状,分析了磁光电混合存储技术的发展趋势,这为该技术的发展提供一些参考。

2 磁光电混合存储技术特点及发展历程

2.1 存储原理和技术特点

磁光电混合存储技术的原理是将数据按照热度分别存储在全固态硬盘(SSD)、磁盘(HDD)和光盘库上,SSD或者HDD阵列构成数据缓冲区,提供高I/O(Input/Output)带宽和高可扩展性,光盘库提供安全可靠的低能耗长期存储服务,且数据可随热度的变化在三者之间智能化迁移。

磁光电混合存储技术既可发挥光盘存储大容量、长寿命、低成本、低功耗和高安全性的优点,又克服了光盘存储速度慢的缺点,同时将磁、光、电三种存储介质整合成一个逻辑存储设备,为用户提供统一的文件访问的标准接口,有效降低数据中心初期建设成本和后期的运维成本,是目前综合性能最好的存储技术,可满足大数据对长效存储设备的要求。

2.2 发展历程

磁光电混合存储这一概念最早由清华大学徐端颐^[12]于2004年提出,经过以国内为主的产业界和学术界不断发展完善,2015年由华中科技大学曹强等^[19]正式提出了这一概念和体系架构。国外在这一领域所做的工作主要集中在高密度光存储部分。其发展历程的标志性事件如下。

2004年,清华大学徐端颐^[12]与企业合作研制的“超大容量信息存储系统”,容量可扩展至PB量级,持续数据传输率大于180 MB/s。其原理是采用虚拟-镜像光盘技术缩短系统平均寻址时间,利用非光盘介质做缓存镜像设备,以电子数据换盘取代频繁的机械换盘。在实现标准冗余独立磁盘阵列(RAID)功能的基础上,应用浮动校验组专利技术进一步提高系统数据的安全性。按照此原理制成的设备早已在清华大学和清华同方共建的中国知网等重要大数据库系统中使用。

2011年,苏州互盟信息存储技术有限公司(以下简称苏州互盟)颁布了自己的企业标准《光盘库》,对产品的主要零部件、产品分类、要求、试验方法和检验规则以及标志、包装、运输、贮存都做

出了规定。

2014年,美国Facebook公司(以下简称Facebook)开始采用蓝光光盘(BD)替代硬盘存储,推出了容纳万张光盘的原型物理样机;松下和索尼公司也推出6U机架1080片光盘库,由12张光盘构成一个RAID组,设计专用前置机管理光盘库和RAID组。

2015年,华中科技大学曹强等^[19]申请了专利《一种磁光电混合存储系统及其数据获取和存储方法》。

2016年,苏州互盟研制出可靠性高、通用性强、成本低的PB级磁光混合存储系列产品,相对于国际同类产品拥有强有力的竞争实力^[13]。广东紫晶信息存储技术股份有限公司(以下简称广东紫晶)和中国华录集团有限公司(以下简称中国华录)分别颁布了企业标准《光盘库通用技术规范》和《蓝光光盘库》。2016年3月,Facebook联手松下推出了采用300 GB光盘的freeze-ray光盘数据归档系统,用于解决数据中心“冷数据”存储问题并大幅缩减数据中心能源成本^[20]。

2017年,广东紫晶又颁布了企业标准《蓝光存储(BDR-25/50 GB)光盘通用技术规范》。北京越洋紫晶数据科技有限公司郝海生等申请了专利《磁光电混合存储方法和装置》。同期,中国华录研发的光磁融合存储系统在底层采用对象存储方式,支持分布式存储架构,同步进行、并行处理,扩充了系统的存储空间^[15]。中经云数据存储公司利用蓝光存储介质进行冷数据存储,通过对冷热数据在不同存储介质间的智能分配,实现了大数据的安全、高效、持久、低成本、低能耗存储^[16]。

2018年,广东紫晶根据生命周期管理(DLM)办法,将热数据自动缓存到磁盘上,冷数据刻录在蓝光光盘中进行保存^[17],并利用智能分层技术提高了磁盘的利用率,节省文件复制导致的网络带宽浪费,增强了系统的横向扩展能力^[18]。

3 磁光电混合存储关键技术及研究现状

磁光电混合存储设备要实现低成本、高性能的大数据存储,除了系统集成架构,还需要软硬件两方面关键技术的支撑。与此同时,制订统一的标准,可推动磁光电混合存储技术向产业化、商业化快速发展。

3.1 存储系统结构

磁光电混合存储系统结构涉及到分层/分布式存储法、基于磁光阵列存储法、介质用量最优组合等三项关键技术。其中,分层/分布式存储法获得广泛应用并成为未来发展的重点。

3.1.1 分层/分布式存储法

分层存储(HSM)是根据数据文件使用频率的高低,将文件划分为多个层次,分别存储在不同层级的介质中^[21],依据访问频率,数据分为热、温和冷三类数据,大数据背景下它们占总数据量比例约为5%、15%、80%,即大数据约等于冷数据^[22]。

曹强等^[19]提出的磁光电混合存储系统及其数据获取和存储方法,是目前磁光电混合存储中较常采用的分层存储模式。如图1所示,该系统包括内存、固态硬盘存储区、磁盘存储区和光盘存储区。具体写操作过程如图2所示。

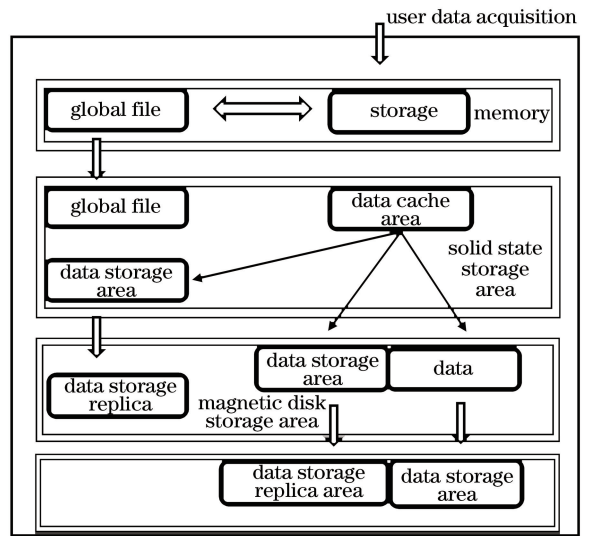


图1 一种磁光电混合存储系统的结构示意图
Fig. 1 Structural schematic of a magnetic-optical-electric hybrid storage system

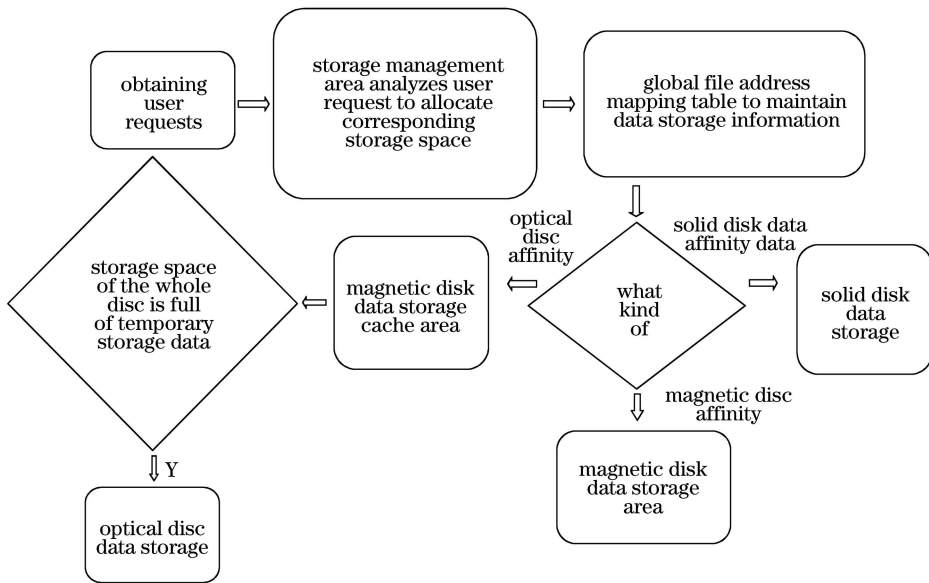


图2 磁光电混合存储系统的写操作

Fig. 2 Writing operation of magnetic-optical-electric hybrid storage system

基于这种分布式存储结构,曹强等^[23]使用了磁光电融合方法和虚拟化存储机制,通过将硬盘或固态硬盘作为光存储的大容量缓存,设计和开发了一种超大容量光盘库,把超过万张的光盘放置在一个库体内,通过机械装置实现光盘的自动存取,可实现单张光盘独立读取。光盘库的物理结构如图3所示,装置为六瓣的转笼式结构,有6列×10层×17个槽匣×12张光盘总共12240张光盘。

而姜晓青等^[24]根据访问频率设计了基于文件热度的蓝光光盘库分类磁光电混合存储系统,图4是系

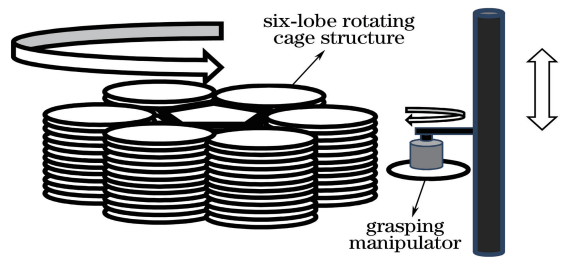


图3 超大容量光盘库的机械结构示意图
Fig. 3 Schematic of mechanical structure of an ultra-large scale optical disc library

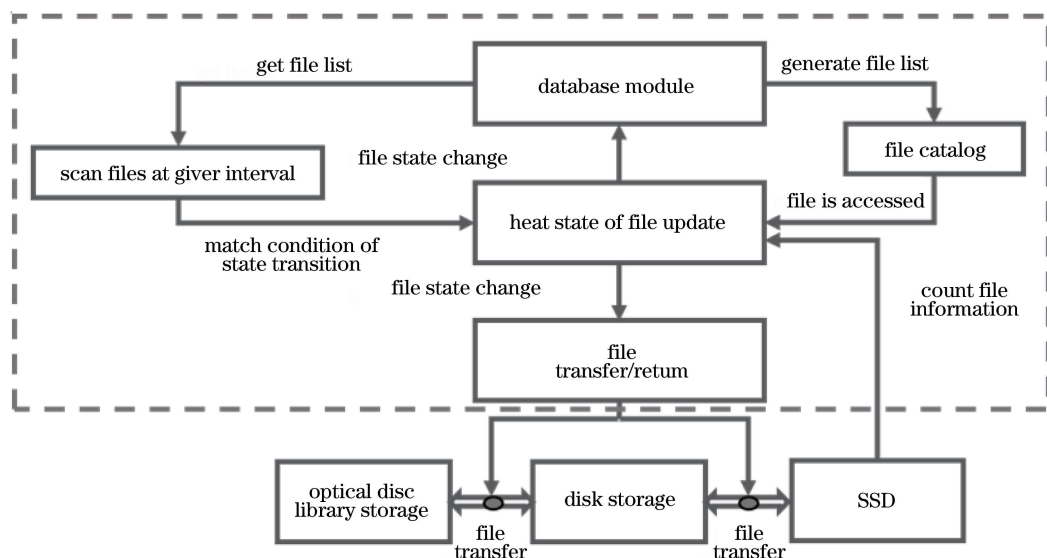


图4 分类存储各模块关系

Fig. 4 Modules and their relationships of classified storage

统分类存储的各模块及其关系组成示意图。

中科开迪则推出了机柜式蓝晶系列和集装箱式蓝立方系列数据中心产品^[25], 单体机柜容量最高可达 1.2 PB, 支持单片 25 G、50 G、100 G、200 G 的光盘容量, 采用磁光电融合产品建设的数据机房能源使用效率(PUE)值仅为 1.12。以 10 年为存储周期的 10 PB 数据为例, 其部署成本为传统磁介质数据中心的 1/3, 耗电量为 1/4, 碳排放量仅为 1/5。其中蓝晶系列 25920 单机柜最大可放置 25920 张光盘, 存储容量可达到 7.8 PB; 而蓝立方系列中 40 英尺 (1 英尺=30.48 cm) 集装箱可装载 259200 盘片, 容量最大为 78 PB。

Yan 等^[26]提出了一种机架式的 ROS (Robot Operating System) 系统, 利用磁光电混合存储能够实现 PB 量级的容量, 并且保证光盘间的内联可访问性。ROS 系统的读写速率分别可以达到 323 MB/s 和 236 MB/s。

3.1.2 基于磁光阵列存储法

刘建梅等^[27]提出的磁光阵列法 (ORAID) 则是将磁盘模块和光盘模块配置在同一个数据存储层中, 其中光盘模块隐含于磁盘模块之后, 利用映射数据库在两者之间建立起对应的关系, 用户看不到对光盘模块进行的任何操作。苏州互盟的磁光阵列产品采取光盘匣加机械手操作单元结合的方式, 智能多盘抓盘器实现任意光盘匣与光驱之间的任意加载、卸载。光盘匣中可直接叠放 12 张蓝光光盘, 共两个光盘匣, 可装载 24 张光盘^[28]。ORAID 原理与

技术目前还没有应用到实际的磁光电混合系统。

3.1.3 介质用量最优组合

在磁光电混合存储系统中常根据用量组合能否动态改变划分, 将最优化方法分为静态配置方法和动态配置方法, 研究不同比例下达到最佳性价比的组合, 从而将混合存储系统的开销降到最低。

3.2 软件部分关键技术

磁光电混合存储系统软件部分涉及到数据热度分类和更新、数据迁移策略和系统异构性等多项关键技术, 目前研究的热点是数据热度分类和更新。

3.2.1 数据热度分类和更新

对数据热度分类的依据常用的是数据创建时间、访问频率、最后访问时间或响应时间等。如姜晓青等^[24]设计的蓝光光盘库文件管理系统是基于访问的时间间隔, 创建一个定时器对象, 每秒钟程序都会将当前时间与程序设定的时间进行对比, 通过比较当前时间与文件最近被访问时间的差值和预先设定的时间阈值, 对热度进行分类和更新, 故此系统需预先设置信息统计模块, 建立相关的文件信息链表。图 5 为热数据分类流程示例, 若采用刻录之后无法删除和修改的只读光盘, 则在温数据分类中有所区别, 除了要比较当前时间与文件最近被访问的时间外, 还要判断在光盘库中是否存在该文件的备份。若存在可直接删除文件, 则调用文件热度转换模块; 否则, 还需要调用文件迁移模块, 将磁盘中的内容转存到光盘中进行刻录。

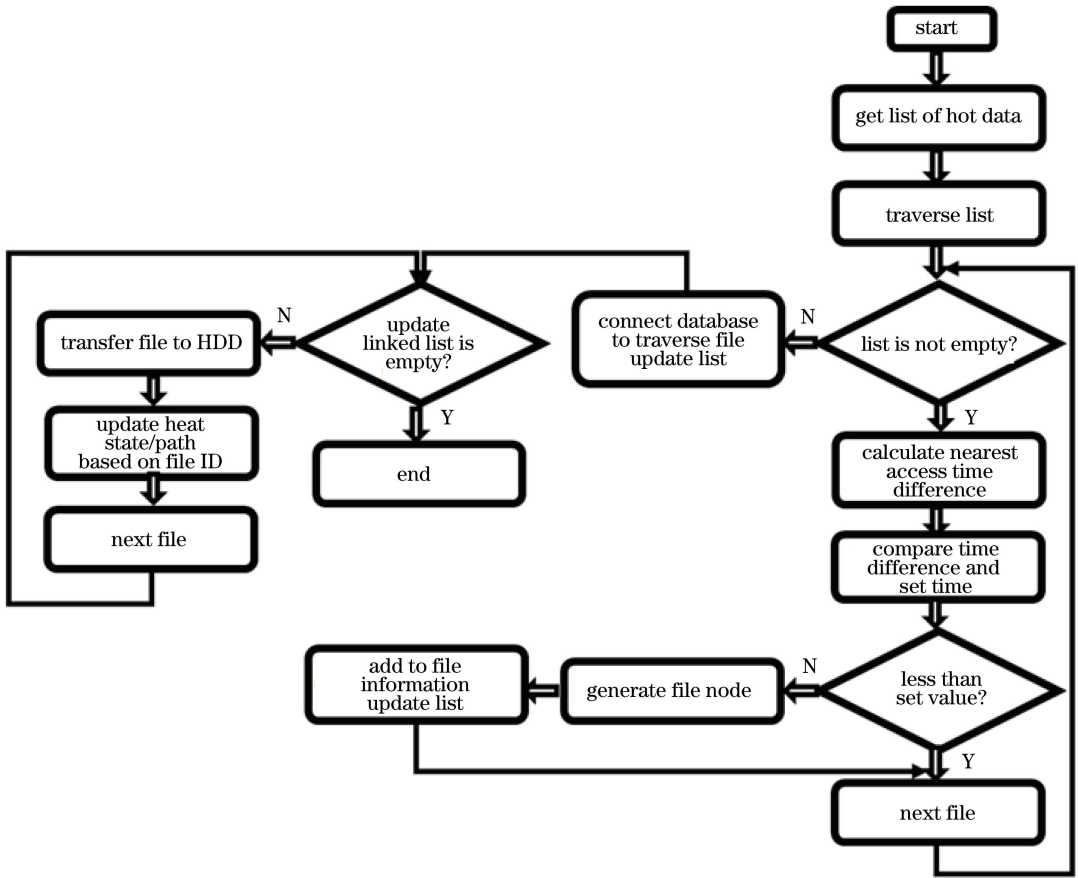


图5 热数据分类流程

Fig. 5 Classification flow diagram of hot data

周世民等^[29]提出的基于闪存的SSD混合存储的数据自适应优化分布算法,是在较长时间的观测期中记录下每个数据的访问特征,包括读写访问总量和读写I/O总次数,再根据访问特征对其进行排序。排序方法由具体的决策策略决定,该算法支持两种决策策略:I/O吞吐量优先策略和I/O次数优先策略,区别在于单位存储空间数据的贡献值是基于读写总量还是访问次数。自适应优化分布算法能够自动适应不同情况下的应用特征,有效提升效率,从而在不同介质之间自动形成理想的数据分布。

3.2.2 数据迁移策略

数据迁移以热点判断为基础,一般是根据算法确定一个最优待迁移集合为单位再进行迁移,通常分成数据块(block)级、文件级和区(Extent)级^[30]。数据块是以4 kB大小划分,是最小的集合单位,好处在于迁移周期短、效率高,但是会大幅增大系统的内存开销,如文献^[31]提出了基于块的迁移算法,将频繁读的页面迁移到SSD上以利用SSD良好的读性能,降低系统的I/O开销;文件级是以所属的文件作为相关的组织单位,可以有效减少元数据的数

量和系统的开销,如罗保山等^[32]提出的迁移算法可完成文件集合的迁入迁出,并实现了对已迁移文件的访问重定向。测试结果表明,系统效率提升了10%左右,但是采用这种迁移策略时文件的大小往往不一致,计算迁移数据的过程会很复杂,故应在保证系统性能的同时尽可能多迁移热点数据;此外大文件的迁移对系统性能波动较大,要尽可能在系统负载较轻时进行迁移;Extent是以指定的大小(>4 kB)范围内物理上连续的数据作为基本单位,且每次迁移大小是固定的,这样在减小系统内存开销的同时简化了数据集选取过程,但是Extent的大小会较大影响系统性能,如何合适选取是关键。

3.2.3 系统异构性

李勇等^[33]提出了一种基于负载特征识别和访问性能预测的缓存分配算法,采用缓存分区策略,优化缓存调度来平衡不同设备间的I/O请求差异,减小甚至于消除性能最差的设备在异构存储系统中的性能瓶颈问题。这种算法还可根据负载特征设置不同访问标记位的权值,故能够适应不同访问特征的应用混合访问。

3.3 硬件部分关键技术

在磁光电混合存储系统中,硬件涉及到高密度存储技术、光盘读写和伺服、光盘机械手以及标准和专利。高密度存储技术中双光束超分辨和全息存储是目前研究热点。

3.3.1 高密度存储技术

在磁光电混合存储系统中,不管采取分布式(分层)存储方法还是基于磁光阵列的存储法,都要基于磁、光、电三种存储介质实现大容量、高密度存储,而且每种存储介质都有多种技术方案。限于篇幅,这里主要介绍高密度光存储技术,包括高密度光盘材料及读写测试以及读写伺服技术。

3.3.1.1 磁存储

磁存储介质常用的有计算机磁带、计算机磁盘(软盘和硬盘)、录音机磁带、录像机磁带等^[34],其中硬磁盘具有容量大、体积小、速度快等优点,应用最为广泛。现在常采取 RAID 将多个独立的硬盘按不同方式组合形成一个硬盘组,从而提供更高的存储性能和数据备份技术。根据不同的性能要求及冗余等级,RAID 阵列可分为不同等级,包括 RAID0~RAID5 以及混合式的 RAID10 和 RAID50 等^[35]。

3.3.1.2 电存储

电存储技术是以 SSD 为代表的存储技术。SSD 具有数据存储速度快、防震性好、无噪音、发热量小等优点,随着其成本降低和技术提升,该技术将逐渐取代传统硬盘,大幅度提升系统的整体性能。

3.3.1.3 光存储

光存储技术从 20 世纪 60 年代末 70 年代初期开始发展,主要经历了 CD、DVD 和蓝光光盘三代产品的更新迭代,为适应信息量剧增的形势,信息存储正在向超高密度信息存储方向发展,而由二维存储到多维存储成为重要发展趋势^[36]。随着大数据热潮、光存储的发展和用户意识的普及,2017 年下半年,光存储进入快速发展阶段,2018 年到 2019 年将有很大的突破点^[9]。光存储研究主要围绕两个方向并行:新的存储方式和性能更优良的存储介质材料。目前,最有望工程化的是双光束超分辨光存储技术、全息存储技术和玻璃存储技术。

1) 蓝光光存储技术

使用短波长、高数值孔径物镜的蓝光光盘,可在一张单面单层的 12 cm 光盘上存放 15~27 GB 的信息。但受光学系统衍射极限的限制,且短波长激光器和大数值孔径透镜具有已接近目前技术所能达到的极限和成本太高的缺陷,其存储密度也已趋近

于理论技术的极限。为了扩充容量、扩展应用领域,人们开始通过多层蓝光存储技术来提高蓝光光盘容量。多层蓝光光存储的实现途径主要有基于荧光染料的多层光盘、基于光学开关层的多层光盘、多波长多层存储技术和微全息多层存储技术等^[37-38]。目前,100 GB 蓝光光盘在光盘库已普遍采用,300 GB 蓝光光盘已开始大规模普及,500 GB 蓝光光盘正在研发中。由于受记录层透射率的限制,蓝光单张光盘的层数一般不超过 40 层,存储容量不超过 1 TB。对比在线服务上已提供的串流服务,蓝光光盘的优势就是超高比特率(最高 108 Mb/s),而一般在线 4 k 超清串流只有 16 Mb/s。

影响光盘存储寿命的光盘原料主要是三种:聚碳酸酯盘基原料、记录层材料和反射层材料。记录材料主要有光热塑料、光折变晶体和光致聚合物等。材料的老化是需要解决的主要问题。档案级可录蓝光光盘通过材料和结构优化,可以抵抗温湿老化、光氧老化,机械磨损,生化腐蚀等,目前寿命已经达到了 100 年以上。

2) 多波长多阶光存储

多波长光存储的原理主要利用光致变色材料的分子级光开关效应,同一时刻在对应的光致变色材料利用对应的激光波长,可实现多波长和多层并行信息存储^[39]。其原理如图 6 所示,三种不同的光致变色材料对应于不同的吸收波长,可以分别旋涂在光盘的不同层或混合旋涂在一层作为记录层,每一个记录层只与对应的记录光产生激发,而对其他层的记录光则透明。例如,当波长为 λ_1 的激光记录光致变色层,只有对应于吸收峰为 λ_1 的光致变色材料发生光开关效应,而其他记录材料则不产生吸收。当三束光同时照射记录平面的同一点,每个记录面只会吸收对应波长的激光,并产生相应的信息记录。通常的波段选择为 780、650、532、405 nm。

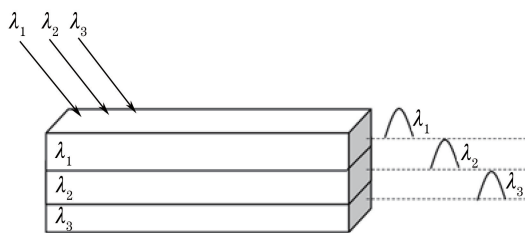


图 6 多阶多波长存储原理图

Fig. 6 Schematic of multi-wavelength and multi-level optical storage

齐国生等^[40]采用三种二芳基乙烯作为记录媒介,其记录波长分别为 532、650、780 nm,通过混合

旋涂的方式制成薄膜,在同一点的位置实现三种信号的 50 次的重复读出。胡华等^[41-42]对二芳基乙烯的曝光量建立了理论模型,通过不同的曝光量获得了不同的反射率,并进行了 4 阶和 8 阶的静态存储实验。

多波长多阶光存储可明显提高记录存储密度,当在单个记录点采用 n 个波长 m 阶存储数据,存储数据转移率可增加 $n \times m$ 倍。清华大学国家光盘工程中心采用三波长 8 阶存储模式,通过实验数据显示其存储能力可达到 100 GB,平均综合信息记录密度达到 320 MB/cm^2 ,同时数据迁移率可以达到 40 MB/s ^[43-44]。但多阶多波长光存储在实际应用时还存在诸多问题:①多阶多波长存储作为新的读写模式需要新的伺服控制及编码等,没有蓝光成熟,且存储能力并不能达到相应的要求;②有机光致变色材料随时间增加,光学态发生转化,造成信息误码率的增加。

3) 双光束超分辨率光存储技术

双光束超分辨技术有别于传统光存储技术,该技术利用双束光进行超分辨读写,其基本原理类似于 2014 年诺贝尔化学奖得主斯特凡·凡斯赫尔发明的荧光成像技术,最早是由 Hell 等^[45]于 1994 年提出。其中一束光作为记录诱导光;另一束特殊调制后的光具有空心光强分布特性,作用于记录介质上时能够产生“擦除”效应,抑制光记录的过程。因而这种双束光记录方式能够突破衍射极限进一步缩小记录点尺寸,从而提高单盘光存储信息记录的密度,加上多层光存储技术,具有实现单盘容量 $1 \text{ TB} \sim 1 \text{ PB}$ 的潜力。澳大利亚顾敏院士领导的光存储研发团队 2013 年就已经完成了单盘 1 PB 的存储密度和单次记录节能 85% 的原理演示性实验,并申请了全球专利保护技术 (PCT/AU2013/001378)。该颠覆性成果帮助团队获得了提名 2013 年澳大利亚国家创新奖的殊荣,并被国际数据存储龙头企业 Facebook 评价为下一代绿色大数据存储技术的终极方案。

目前该项技术面临的瓶颈问题是存储记录介质材料研发周期长,而且进展缓慢。国内以中国科学院上海光学精密机械研究所牵头的超分辨光存储课题组目前已合成并评测了 1,2-双(2-甲基-6-苯基-1-1 二氧-3-苯并噻吩)全氟环戊烯(二芳基乙烯 D1)等适合双光束超分辨记录的介质材料光学特性,并测试了其在超分辨记录中的淬灭特性,模拟计算得出可达到的最高分辨率为 60 nm ,并设计了记录和读

出方法^[46]。但二芳基乙烯这种有机光致变色材料存在随时间增加光学态发生转化,造成信息误码率增加的缺陷,故需要研发稳定性更好的新型超分辨记录材料。

4) 近场光存储技术

近场光存储的原理是将入射光束通过光学系统形成直径小于 100 nm 的存储光斑,而光学系统出射端面与存储介质的间距保持在深亚微米范围内,将光斑直接耦合到存储介质进行存储。近场光学分辨率突破了瑞利衍射极限,达到了纳米量级,这一重要性使得光学成像分辨率有可能提高几十倍至上百倍;将近场光应用于光存储中,用超精密机构实现扫描,对于提高光存储的密度具有非常重要的意义^[47]。

目前在这一方面的研究主要有孔径探针型近场光存储技术、固体浸没透镜近场光存储技术、超分辨近场结构光存储技术及各类使得聚焦光斑直径降到衍射极限以下的薄膜、掩膜材料技术等方面。其中应用可能性最高的是固体浸没式透镜方案,通过在记录材料表面滴涂荧光显微镜油继续增大物镜的数值孔径,当激光通过物镜到达浸没式透镜时,会将光束压缩到理论值为 50 nm 的光斑,有可能实现 1 TB/in^2 ($1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}$) 的存储密度。

近场光存储具有高密度、高速度、高集成度等优点,存储密度比现有光盘提高了一个数量级以上,有望成为新一代光存储的重要途径和手段。但近场光存储光盘的主要缺点是较难形成多层存储结构,因此对存储容量的提升效果还有待商榷,也导致近几年的研究陷入低潮。

5) 全息存储技术

全息存储是一种高密度三维光存储技术,采用的是与传统二维存储完全不同的机理:激光器输出激光束经分光镜分为两束光,一束光经过空间调制器后携带物体的二维信息成为物光,另一束作为参考光束,两束光相遇发生干涉,使得数据信息以全息图的方式被记录在存储材料中,在保存物光振幅信号的同时,还能保存其完整的空间相位信息^[48]。读取时,利用之前记录的参考光照射存储介质,由于体全息光栅的衍射效应,在原信号光方向可再现出信号光,由 CCD 或 CMOS 图像传感器等光电探测器完成数据的读取^[49]。

由存储原理可知体全息存储技术有体式存储与并行读写两个显著特点。体式存储可将多组数据记录在存储材料同一位置,实现数据的高密度存储,其理论体存储密度可达 $1/\lambda^3$ 量级^[50],其中 λ 为记录

光波波长。并行读写是指信息以数据页为单位进行读写,可具有极高的数据传输率,有望达到 1 GB/s,因此全息光存储被认为是很有前途的一种大数据光存储技术。但其也面临不少挑战,目前要真正实现全息存储技术的商业化还有许多难题需要解决,光全息技术、记录介质、复用技术、激光光源、空间调制器和探测器阵列等技术仍有很大的发展空间。尤其是记录介质,在国内已成为制约全息存储技术发展的瓶颈。体全息高密度存储所涉及的关键技术和研究现状在文献[50]中均有详细的描述。

相对于磁存储、点存储以及传统的光存储等现行的存储技术,全息存储技术在存储密度和读取速度方面都具有很大的提升空间,尤其是与开放磁带技术相比,全息存储在成本与传输速率方面有明显优势^[51]。但由于全息存储目前还没有突破衍射极限,所以其密度的提升还是有一定的限制。

6) 玻璃存储技术

日本日立公司于 2012 年 9 月推出一种在石英玻璃片上存储数字信息的新方法。这种技术是在石英玻璃薄片上通过飞秒激光器制造点阵以二进制方式将数据存储下来,可采用普通的光学显微镜读取。目前的薄片原型可以支持四层点阵数据,每平方英寸能存储 40 MB 的数据,与一张标准 CD 的存储密度相当。

英国南安普敦大学在 2013 年 7 月、俄罗斯莫斯科州立大学在 2018 年 1 月均用实验展示了基于玻璃介质的五维光存储技术。该技术采用纳米结构玻璃材料,利用飞秒激光入射将玻璃纳米结构变成纳米格栅来保存信息,利用光学显微镜和偏光器即可读取信息。与传统光盘不同的是,玻璃存储收集的是折射而非反射激光,此折射光包含了纳米格栅的方向、激光折射强度、三维坐标等五维数据状态。因此,五维光碟具有更大的数据存储密度,理论上其存储的数据量是蓝光的近 3000 倍,其耐热温度可以达到 1000 °C,并且存储寿命极其稳定。

目前基于玻璃三维存储的产业化还需要一系列的技术积累,例如,玻璃记录所需的飞秒脉冲激光器整机小型化以适用于光存储系统;此外,进一步缩短信息记录的时间也是玻璃存储技术所面临的挑战。

与现有光存储技术相比,玻璃存储技术稳定性高、体积小、存储能力强、寿命可达几千年,适用于海量信息的长时间安全存储^[52]。

7) 荧光纳米晶体存储技术

荧光纳米晶体存储技术原理是采用激光改变荧

光纳米晶体颗粒的电子状态,进而改变其荧光特性,在代表数据信息开关的模式之间高效地切换,从而实现信息数据的存储。

此存储方式有望从二维拓展至三维,从而使存储密度达到千兆字节每立方厘米,可在小型数据立方体上实现 PB 量级的数据存储。该技术能够同时存储几个比特,存储内容可重复写入,且能量效率高^[53],实现的关键在于研发将纳米晶体嵌入到玻璃或者聚合物中的新材料。

3.3.2 光盘读写和伺服

光盘存储是一种高密度的存储方式,光学头的写入光功率、光束像差、伺服误差等对于信息记录斑点有很大影响,可能会引起信号调制度的降低;信息斑点的畸变会降低信号的信噪比,增大误码率^[54]。

光学头包含准直光学系统、聚焦光学系统、误差信号提取系统以及伺服系统的执行机构等部分^[55-56]。在 DVD 光学读取头的设计上,光点大小、波面像差的大小、能量利用效率、工作距离和物镜的重量可用于设计评估。而在蓝光光盘技术中,激光头中高数值孔径物镜尤为重要。对于多层光盘的读写,还需要通过光盘预置层和基于像散像差的光学头等多方面的综合设计以减少层间串扰^[57]。

目前,尤其对于超分辨光存储光路系统而言,存在着光路机械或热不稳定、系统占地庞大、光路具有波长选择性、高数值孔径物镜笨重且色差未完全校正等问题。光学头的设计需要高度集成超分辨光存储光路中产生实心 and 空心光斑的光路部件,实现光路稳定化、小型化、通用化。在小型化设计中,可优化组合微型物镜、衍射元件及微纳光学器件减少光学元件的数量和种类,简化光路,缩小系统的体积。

高密度光盘的伺服分为聚焦伺服和循迹伺服,在误差信号的检测方法上聚焦误差信号采用的方法仍然是传统的像散法、刀口法等,但是随着盘片存储容量的不断增加,对读取系统的循迹伺服精度要求也进一步提高,蓝光光盘系统中采用是精度更高的相位移动 DPP(Differential Push Pull)法^[58]。工程应用上控制算法主要采用数字比例积分微分(PID)控制算法,随着智能控制研究的兴起,研究的热点转向自适应 PID 控制方向,如考虑到误差信号大部分是由光盘翘曲或偏心引起的,具有周期性。倪屹等^[59]通过增加数字重复控制器,较好地抑制了周期性扰动,可极大提高蓝光光盘的伺服精度。此外,利用基于神经网络、模糊理论、遗传算法等自适应 PID 控制算法^[60-62]也被验证具有良好的稳健性,具有显

著减小系统的超调量、可在线优化等优点,具有良好的应用前景。

3.3.3 光盘机械手

机械手要能顺利到达光盘库空间各个位置,保证安全、高速、准确地将光盘片从库中取出并送入空闲的指定光盘驱动器中,是整个系统中关键的执行机构^[63]。另外,光盘库数据平均访问时间比磁带和磁盘高很多,磁带库的平均寻道时间在毫秒级,显然光盘机械手已成为光盘库系统的性能瓶颈^[64]。光盘机械手除了提高装卸载光盘的效率外,还要提高抓盘的平顺性,保证机械手在高速抓盘和转移时能避免由于机械共振导致的光盘掉落。张帆等^[65]在2012年申请了一项应用于光盘库机械手的专利,可保证拾取光盘盒的稳定性。

3.4 标准和专利

截止到2017年,国内存储企业如中国华录、广东紫晶、苏州互盟等,都根据各自公司情况制定了相关的企业存储标准及通用技术规范。相关标准均包含磁光电混合存储的术语与定义、缩略语说明、系统组成与分类、技术要求、检验方法、检验规则和标准、包装、运输及存储等方面内容;企业标准中还对产品的型号及命名方法进行了说明。

除前文中涉及的相关专利外,还有《磁光电混合存储方法和装置》专利提出一种磁光电混合存储方法^[66]。该方法能够实现闪存、磁盘和光盘三种异构存储介质的融合存储,对不同介质中存储的文件进行任意读写,提高混合存储装置的存取效率,降低运行成本。

4 技术发展动向

以国内为主的多个团队对磁光电混合存储技术的研究都做出了重要贡献。但目前的磁光电混合存储技术及产品还不能完全满足大数据存储的需求。除了软件方面,硬件方面尤其是光盘容量亟待提高。

多层光盘存储技术可利用原有光存储产业基础,是未来数年内可以发展的一种技术路线,但其容量提高有限,单盘极限容量大约在1 TB,故其存在时间不会很长;全息存储技术是一种值得关注的技术,开发时间较长,但其不是超分辨率的光存储技术,因此,可作为中期发展目标;超分辨率近场结构存储技术是第一种以超光学衍射极限为开发目标的光存储技术,但其目前只能单层存储,需要改进技术实现容量提升;双光超分辨存储技术是澳大利亚顾敏院士提出的被学术界和产业界公认的大数据光存

储的有效技术方案,具有实现单盘容量1 TB~1 PB的潜力。核心团队的前期研究成果理论验证了该技术的产业化前景,在原理上解决了该技术产业化的一系列关键技术瓶颈,为产业化铺平了道路。具有投入相对较少,且发展潜力巨大,可作为重点技术布局。同时玻璃存储技术和荧光纳米晶体存储技术作为比较新的存储技术,也有很强的发展潜力,应该予以重视。

根据上述介绍和分析,从大数据光存储产业发展的角度来看,值得关注的技术发展动向有以下三个方面:

1) 制定和完善与磁光电混合存储技术相关的标准

2017年9月,为加速我国磁光电混合存储的产业发展,中国科学院上海光学精密机械研究所高密度光存储技术实验室牵头,联合国内光存储设备主要生产厂商、科研机构以及产品用户代表等,针对国内外采用系统集成理念开发的适应冷数据、温数据、热数据存储的磁光电混合存储设备,在各个企业已经制订的企业标准和产品说明书的基础上,共同启动了制定国家标准《磁光电混合存储系统通用规范》立项^[67]。

标准的制定和实施有利于建立相应的产品性能及指标评测体系,促进磁光电混合存储的产业发展,推广混合存储产品,促进大数据存储产业向绿色、节能、安全、低成本、自主可控的方向发展。

2) 不断完善产品系统集成技术

目前日本主要是将光盘库做成一体化、小型化、高密度、高性能的存储单元。国内在部件技术相对落后的情况下,采用磁光电混合的多级存储结构,开发支持多用户同时存取,能隐藏底层机械延迟和物理光盘边界的元数据与数据分离的全局文件系统,不断升级完善支持大数据热、温、冷数据分级存储的智能化自动分级技术、并行多片光盘数据访问等关键技术,使得磁光电混合存储系统样机的存取带宽、I/O延迟时间等性能指标不断接近传统磁、电存储水平,其容量不断增大,使得每PB数据归档存储的单位能耗降低50%。

目前对大数据分级存储中的通用化,智能化的热、温、冷分级技术为磁光电混合存储集成技术发展的瓶颈问题之一。

3) 继续开展高密度光盘技术研究

商用蓝光光盘已基本具备应用于大数据存储的能力,但单盘容量仍需要大幅提高才有可能取得大

规模应用。因此,开展大容量高密度光盘存储技术研发十分重要。由于衍射极限的限制,光盘单层常规记录密度已经接近极限,因此,人们开始攻克光盘的厚度难关,并应运而生多层方式、全息方式等。目前日本松下 300 GB 蓝光光盘技术已产业化,正在开发 500 GB 蓝光光盘相关技术,预计 2018 年底量产,2019 年推出 500 G 光盘的光盘库。

最近的技术趋势包括:采用突破性的技术发明,彻底打破光学衍射的限制,发展大容量光盘存储技术。为此在国内相关研究机构已经开展双光束超分辨存储、全息存储等技术,包括材料、超分辨读写测试平台和超分辨光驱读写伺服等。

但目前各种高密度光盘技术的发展都遇到了一个瓶颈问题,即光存储记录介质材料的进一步优化和创新。

5 结束语

目前与磁光电混合存储相关的单项技术正在快速发展之中并将进一步取得突破,如单个光盘存储容量将超过 500 G,存储成本也会不断降低。磁光电混合存储技术中软件部分的存储策略、查询算法及系统集成技术将进一步发展,使系统的存取性能接近或达到磁、电存储的在线水平。预计在 2022 年左右相关的单项技术和系统集成技术将达到稳定,并使存储购买成本达到或低于 1 美分/GB。

磁光电混合存储领域中光存储技术研究是着眼于实际数据的存储应用,除了技术本身还要考虑成本、实现方式、市场推广等众多因素。目前的光盘容量无法应对大数据存储发展的需求,因此需要不断研发新的光存储技术。蓝光存储、双光束超分辨率光存储和全息存储技术目前是主要研究方向。

蓝光存储受到衍射极限的限制,其单盘单面的最大存储容量是 500 GB,采用双面结构可达 1 TB/盘。500 GB 容量是采用多层结构来实现。当前实现的是 16 层,理论极限是 42 层。长远来看,蓝光存储技术将继续进行扩展,即与多阶、多波长等技术相结合,如此才能进一步扩大存储容量,以适应未来的发展需要。多层光盘存储技术要突破目前认为的 1 TB 单盘极限容量,还需要在原理上有根本性的突破。

全息存储技术是一种值得关注的技术,开发时间较长,具有体式存储与并行读写两个显著特点,使其可作为中期发展目标。但全息存储目前仍没有突破衍射极限,对温度(热胀冷缩)、外力导致的形变敏

感,同时受材料限制也不能做的很厚,其读写装置目前还比较昂贵,这都是下一步需要解决的问题。

双光束超分辨率光存储技术是一种以超光学衍射极限为开发目标的光存储技术,具有实现单盘容量 1 TB~1 PB 的潜力,是目前学术界和产业界公认的大数据光存储的有效技术方案。澳大利亚顾敏院士核心团队前期的研究成果理论验证了该技术的产业化前景,但目前国内的研发仍需要解决存储记录介质材料这一瓶颈问题,而且只能单层存储,需要改进技术实现容量提升。目前国内是作为重点技术布局。

玻璃存储作为新的光存储技术由于其存储能力强、寿命可达几千年等优点,已逐渐成为研究的热点。同时,由于能量效率高,该技术和荧光纳米晶体存储技术都将成为 HDD 和 SSD 存储技术或者蓝光光盘的很有前景的替代品。

由于各种存储技术都以提高存储容量、密度、可靠性和数据传输率为主要发展目标。因此在未来 5~10 年内,磁光电混合存储技术的发展趋势仍然是以超大容量、超高效率、超高吞吐率、低成本及广泛兼容性的云存储产品为主要目标,通过完善并依据相应的行业标准、国家标准和国际标准,在各行各业中普及高性能、低成本大数据光存储。

参 考 文 献

- [1] Bai H J, Xia J, Lin C. Development of data storage technology at the era of big data [J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2017(4): 174. 白红军, 夏俭, 林晨. 大数据时代数据存储技术的发展[J]. *电子技术与软件工程*, 2017(4): 174.
- [2] Wu Q, Luo Z L. Current research and future of magnetic recording [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2005, 17(1): 88-92. 吴强, 罗自林. 磁存储的研究现状及发展方向[J]. *重庆邮电学院学报(自然科学版)*, 2005, 17(1): 88-92.
- [3] Chen J C, Chen M, Xie C S. HAMR: heat assisted magnetic recording [J]. *China Mediatech*, 2010, 8(4): 21-24, 64. 陈进才, 陈明, 谢长生. 热辅助磁记录技术[J]. *记录媒体技术*, 2010, 8(4): 21-24, 64.
- [4] Chen M D. The status and prospect of solid state hard disk (SSD) products [J]. *Mobile Communications*, 2009, 33(11): 29-31. 陈明达. 固态硬盘(SSD)产品现状与展望[J]. *移动*

- 通信, 2009, 33(11): 29-31.
- [5] Andersen D G, Swanson S. Rethinking flash in the data center[J]. IEEE Micro, 2010, 30(4): 52-54.
- [6] Hoshizawa T, Shimada K I, Fujita K, *et al.* Practical angular-multiplexing holographic data storage system with 2 terabyte capacity and 1 gigabit transfer rate [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2016, 55(9S): 09SA06.
- [7] Zheng M. Development trend of optical storage technology[J]. Data Base Technique, 2018, (4): 188-189.
郑穆. 光存储技术发展趋势[J]. 数据库技术, 2018, (4): 188-189.
- [8] Gan F X. Development of high density optical data storage[J]. Physics, 1999, 28(6): 323-332.
干福熹. 高密度光数据存储技术的发展[J]. 物理, 1999, 28(6): 323-332.
- [9] Zheng M. Research on high density optical storage technology[J]. Electronics World, 2018(2): 122-123.
郑穆. 高密度光存储技术研究[J]. 电子世界, 2018(2): 122-123.
- [10] Dong Y, Jin W Q. Ultra-density optical storage technology[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(8): 543-547.
董怡, 金伟其. 超高密度光存储技术[J]. 激光与红外, 2005, 35(8): 543-547.
- [11] Yang X. Optical storage for big data:Faster, longer, greener[EB/OL]. (2018-05-31)[2018-07-25]. http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/2018-05/31/content_676162.shtml.
杨雪. 光学大数据存储:更快,更久,更绿色[EB/OL]. (2018-05-31)[2018-07-25]. http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/2018-05/31/content_676162.shtml.
- [12] Xu D Y. Super-density and super-speed optical data storage [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2009: 625-626.
徐端颐. 超高密度超快速光信息存储[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2009: 625-626.
- [13] Netzon. The products of netzon attend the world internet of things exposition [EB/OL]. [2018-07-25]. <http://www.hit-netzon.com.cn/wubohuil.html>.
苏州互盟信息存储技术有限公司. NETZON 系列产品进入世界物联网博览会[EB/OL]. [2018-07-25]. <http://www.hit-netzon.com.cn/wubohuil.html>.
- [14] Wuhan Industrial Institute for Optoelectronics. A CD-ROM can hold dozens of the world's largest libraries, research center scientists can lead optical storage revolution in the DT Era[EB/OL]. (2018-05-16)[2018-07-25]. <http://www.wnlo.cn/index.php?id=6314>.
武汉光电工业技术研究院有限公司. 一个光盘库装下数十个世界最大图书馆,研究中心科学家引领 DT 时代光存储革命[EB/OL]. (2018-05-16)[2018-07-25]. <http://www.wnlo.cn/index.php?id=6314>.
- [15] Sohu. Xiongan | ehualu vigorously promotes "Data Lake" strategy [EB/OL]. (2017-09-21) [2018-07-25]. <http://www.ceicloud.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=15>.
搜狐网. 走进雄安公司圈|借力大股东欲试水雄安,易华录大力推进“数据湖”战略[EB/OL]. (2017-09-21) [2018-07-25]. http://www.sohu.com/a/193429554_391476.
- [16] CEICLOUD. Optical and magnetic hybrid storage [EB/OL]. [2018-07-25]. <http://www.ceicloud.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=15>.
中经云. 光磁混合存储[EB/OL]. [2018-07-25]. <http://www.ceicloud.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=15>.
- [17] Amethystum. Amethystum provides stable infrastructure for digitalization construction of Hunan Archive [EB/OL]. (2018-05-11) [2018-07-25]. <http://www.amethystum.com/article/30.html>.
紫晶信息存储公司. 紫晶存储为湖南省档案馆数字化建设提供稳固基础设施[EB/OL]. (2018-05-11) [2018-07-25]. <http://www.amethystum.com/article/30.html>.
- [18] Amethystum. Amethystum makes a deal with Shenzhen Supercomputing Center for 1.2 PB storage expansion project[EB/OL]. (2018-06-22)[2018-07-25]. <http://www.Amethystum.com/article/33.html>.
紫晶信息存储公司. 紫晶存储中标深圳超算中心 1.2 PB 存储扩容项目[EB/OL]. (2018-06-22) [2018-07-25]. <http://www.amethystum.com/article/33.html>.
- [19] Cao Q, Yao J. A magnetic optical electric hybrid storage system and its data acquisition and storage method: 104850358A[P]. 2015-08-19.
曹强, 姚杰. 一种磁光电混合存储系统及其数据获取和存储方法: 104850358A[P]. 2015-08-19.
- [20] Sohu. Panasonic launches freeze-ray data archiving system using 300 GB CD-ROM[EB/OL]. (2016-03-

- 11) [2018-07-25]. http://www.sohu.com/a/62986693_114872.
 搜狐网. 松下推出使用 300 GB 光盘的增强版“freezeray”系列数据归档系统 [EB/OL]. (2016-03-11) [2018-07-25]. http://www.sohu.com/a/62986693_114872.
- [21] Li J J. Research on multi-tiered storage technology for massive storage system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
 李俊杰. 面向海量存储系统的分层存储技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [22] Jiang X Q. Design and implementation of file management system for blu-ray optical disc library [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
 姜晓青. 蓝光光盘库文件管理系统设计与实现 [D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [23] Cao Q, Yan W R, Yao J, *et al.* Design and implementation of an ultra-large scale automatic optical disc library [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0935003.
 曹强, 严文瑞, 姚杰, 等. 一种超大容量自动光盘库的设计与实现 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 0935003.
- [24] Jiang X Q, Jiang H, Xu J S. Study on classification of blu-ray optical disc library storage system [J]. *Industrial Control Computer*, 2016, 29(8): 97-98, 100.
 姜晓青, 姜红, 许俊彬. 蓝光光盘库存储系统分类存储研究 [J]. *工业控制计算机*, 2016, 29(8): 97-98, 100.
- [25] Sohu. How to store data in green? KDS-CHINA, who received Intel's strategic investment: magnetic optical electric hybrid storage [EB/OL]. (2016-09-26) [2018-07-25]. http://www.sohu.com/a/115087884_115475.
 搜狐网. 如何才能绿色地存储数据? 获英特尔战略投资的中科开迪说: 用磁光电混合存储 [EB/OL]. (2016-09-26) [2018-07-25]. http://www.sohu.com/a/115087884_115475.
- [26] Yan W, Yao J, Cao Q, *et al.* ROS: a rack-based optical storage system with inline accessibility for long-term data preservation [C] // *Proceedings of the Twelfth European Conference on Computer Systems*, 2017: 161-174.
- [27] Liu J M, Song L F, Feng J N, *et al.* ORAID: the implementation of a new data storage mode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0935002.
 刘建梅, 宋林峰, 冯剑楠, 等. 磁光阵列: 一种新型数据存储模式的实现 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 0935002.
- [28] Netzon. Product center-HDL24 [EB/OL]. [2018-07-25]. <http://www.hit-netzon.com.cn/HDL24.html>.
 苏州互盟信息存储技术有限公司. 产品中心-HDL24 [EB/OL]. [2018-07-25]. <http://www.hit-netzon.com.cn/HDL24.html>.
- [29] Zhou S M, Chai Y P, Wang L, *et al.* Data layout optimization algorithm for database of hybrid storage with solid state drive [J]. *Computer Engineering*, 2015, 41(4): 55-59.
 周世民, 柴云鹏, 王良, 等. 固态硬盘混合存储数据库的数据分布优化算法 [J]. *计算机工程*, 2015, 41(4): 55-59.
- [30] Zhu Q, Li X Y. A review on hybrid storage [J]. *Microcomputer Applications*, 2013, 29(2): 33-38.
 祝青, 李小勇. 混合存储综述 [J]. *研究与设计*, 2013, 29(2): 33-38.
- [31] Yang P, Jin P, Yue L. Hybrid storage with disk based write cache [C] // *Proceedings of the 16th International Conference on Database Systems for Advanced Applications*, 2011: 264-275.
- [32] Luo B S, Zhang X Y, Wang X, *et al.* Research on hybrid storage data migration strategy [J]. *Computer Technology and Development*, 2016, 26(6): 82-86.
 罗保山, 张鑫葵, 王栩, 等. 混合存储数据迁移策略研究 [J]. *计算机技术与发展*, 2016, 26(6): 82-86.
- [33] Li Y, Wang R, Feng D, *et al.* A cache management algorithm for the heterogeneous storage systems [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2016, 53(9): 1953-1963.
 李勇, 王冉, 冯丹, 等. 一种适用于异构存储系统的缓存管理算法 [J]. *计算机研究与发展*, 2016, 53(9): 1953-1963.
- [34] Chen H. *Instruction of digital media technology* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2015.
 陈洪. *数字媒体技术概论* [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2015.
- [35] Li Z H, Lou X X. Progress of SSD-based RAID technology [J]. *World Sci-Tech R&D*, 2017, 39(1): 33-38.
 李振华, 楼向雄. 固态硬盘 RAID 阵列技术进展 [J]. *世界科技研究与发展*, 2017, 39(1): 33-38.
- [36] Xu D Y. Progress in basic research on optical storage

- technology in China[J]. China Mediatech, 2006(4): 14-16.
- 徐端颐. 我国光存储技术基础研究的进展[J]. 记录媒体技术, 2006(4): 14-16.
- [37] Saini A, Christenson C W, Khattab T A, *et al.* Threshold response using modulated continuous wave illumination for multilayer 3D optical data storage [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(4): 043101.
- [38] Yan M M. Analysis of the design of multilayer blue light disk driver[J]. China Mediatech, 2008(3): 29-32.
- 严明铭. 多层蓝光光盘驱动器设计中的问题分析[J]. 记录媒体技术, 2008(3): 29-32.
- [39] Xu D Y, Hu H, He L. Multi-wavelength and multi-level optical storage based on photochromic materials [C] // Seventh International Symposium on Optical Storage, 2005, 5966: 40-44.
- [40] Qi G S, Xiao J X, Liu R, *et al.* Study on multi-wavelength photochromic storage of diarylethene [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(4): 1076-1080.
- 齐国生, 肖家曦, 刘勇, 等. 二芳基乙烯的多波长光致变色存储研究[J]. 物理学报, 2004, 53(4): 1076-1080.
- [41] Hu H, Qi G S, Xu D Y. Experiment study of multilevel data storage based on photochromism[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(8): 951-954.
- 胡华, 齐国生, 徐端颐. 基于光致变色原理的多阶存储实验研究[J]. 中国激光, 2004, 31(8): 951-954.
- [42] Hu H, Pei J, Xu D Y. Multi-level optical storage in photochromic diarylethene optical disc [J]. Optical Materials, 2006, 28(8-9): 904-908.
- [43] Xu D Y. Multi-dimensional optical storage [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- 徐端颐. 多维光学存储[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [44] Yuan H, Xu D Y, Zhang Q C, *et al.* Dynamic model of mastering for multilevel run-length limited read-only disc[J]. Optics Express, 2007, 15(7): 4176-4181.
- [45] Hell S W, Wichmann J. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy [J]. Optics Letters, 1994, 19(11): 780-782.
- [46] Liu T C, Zhang L, Sun J, *et al.* Optical properties of dithienylethene and its applications in super-resolution optical storage [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0903001.
- 刘铁诚, 张力, 孙静, 等. 二芳基乙烯光学性质及在超分辨光存储中的应用研究[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0903001.
- [47] Wei J S, Zhang Y P, Ruan H, *et al.* Near-field optical recording and its recent progress[J]. Progress in Physics, 2002, 22(2): 188-197.
- 魏劲松, 张约品, 阮昊, 等. 近场光存储及其研究进展[J]. 物理学进展, 2002, 22(2): 188-197.
- [48] Tan X D. Optical data storage technologies for big data era[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(9): 0935001.
- 谭小地. 大数据时代的光存储技术[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 0935001.
- [49] Li J H, Liu J P, Lin X, *et al.* Volume holographic data storage[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1000001.
- 李建华, 刘金鹏, 林泉, 等. 体全息存储研究现状及发展趋势[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1000001.
- [50] van Heerden P J. Theory of optical information storage in solids[J]. Applied Optics, 1963, 2(4): 393-400.
- [51] Anderson K, Ayres M, Sissom B, *et al.* Holographic data storage: rebirthing a commercialization effort [C] // Proceedings of SPIE, 2014, 9006: 90060C.
- [52] Beresna M, Gecevičius M, Kazansky P G, *et al.* Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(20): 201101.
- [53] Riesen N, Pan X, Badek K, *et al.* Towards rewritable multilevel optical data storage in single nanocrystals [J]. Optics Express, 2018, 26(9): 12266-12276.
- [54] Gong M L, Pan L F, Xu D Y, *et al.* The write-in performance of optical head in optical recording [J]. Journal of Optoelectronics • Lasers, 1991, 2(2): 93-97.
- 巩马理, 潘龙法, 徐端颐, 等. 光盘存储光学头的写入特性[J]. 光电子 • 激光, 1991, 2(2): 93-97.
- [55] Wang J P. Research on key technology of DVD optical head [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003.
- 王继平. DVD光学读取头关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
- [56] Ma J S, Pan L F, Fang N. Research on the design of automatic test and evaluation equipment for dynamic signals of DVD pickups [J]. Industrial Instrumentation & Automation | and Instrumentation

- Automation, 2002(5): 66-68.
- 马建设, 潘龙法, 方南. DVD 光学头性能参数测试与评价仪的设计研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2002(5): 66-68.
- [57] Hao R, Bu C. Multilayer optical storage for big data center: by pre-layered scheme[J]. Proceedings of the SPIE, 2013, 8913: 891308.
- [58] Zhang J J, Wang Y X, Feng S M. Analysis of crosstalk between radial tilt error and tracking error in tracking servo of blue-ray disc[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(4): 25-30.
- 张晶晶, 王宇兴, 冯仕猛. 蓝光光盘循轨伺服中盘片径向倾斜的影响分析[J]. 光电工程, 2011, 38(4): 25-30.
- [59] Ni Y, Shen Q H, Pan L F, *et al.* The adaptive repetitive controller designed for high density blue-ray disc servo system: 200710176049[P]. 2007-02-01.
- 倪屹, 沈全红, 潘龙法, 等. 用于蓝光高密度光盘伺服系统的周期自适应重复控制器: 200710176049 [P]. 2007-02-01.
- [60] Zhang M F, Cai J W. Design of BP neural network adaptive PID controller of DVD pick-up head [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(5): 849-852.
- 张美凤, 蔡建文. DVD 光学头的 BP 神经网络自适应 PID 控制器设计 [J]. 半导体光电, 2015, 36(5): 849-852.
- [61] Cai J W, Li Y, Dong C J, *et al.* Applications of fuzzy PID algorithm in DVD pick-up head control[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(6): 1047-1049.
- 蔡建文, 李源, 董才俊, 等. 模糊 PID 算法在 DVD 光学头控制中的应用研究 [J]. 半导体光电, 2013, 34(6): 1047-1049.
- [62] Li K, Liu J C. Application of ant colony PID in optical head control of high density optical disk system[J]. Laser Journal, 2016, 37(8): 57-59.
- 李昆, 刘继超. 蚁群 PID 在高密度光盘系统光学头控制中的应用 [J]. 激光杂志, 2016, 37(8): 57-59.
- [63] Zhang F. Design and implementation of embedded controller for optical disk library system based on NAS[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- 张帆. 基于 NAS 的光盘库系统嵌入式控制器的设计与实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [64] Liu X, He N, Lu T J, *et al.* Model and analysis for network attached optical jukebox [J]. Application Research of Computers, 2006(4): 48-49.
- 刘炫, 何宁, 陆体军, 等. 网络光盘库模型的建立和分析 [J]. 计算机应用研究, 2006(4): 48-49.
- [65] Zhang F, Zhang Y F. One kind of robot for optical disk library: 201210483412.6[P]. 2014-01-15.
- 张帆, 张永发. 一种应用于光盘库的机械手: 201210483412.6[P]. 2014-01-15.
- [66] Hao H S, Deng G. The method and device for magnetic optical electric hybrid storage: 107193507A [P]. 2017-09-22.
- 郝海生, 邓国. 磁光电混合存储方法和装置: 107193507A[P]. 2017-09-22.
- [67] Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. The national standard initiating conference for general specification of magnetic optical electric hybrid storage system led by SIOM was successfully held in Beijing [EB/OL]. (2017-09-25)[2018-07-25]. http://www.siom.cas.cn/xwzx/zhxw/201709/t20170925_4864235.htm.
- 中国科学院上海光学精密机械研究所. 上海光机所牵头的《磁光电混合存储系统通用规范》国家标准立项启动会议在北京顺利召开 [EB/OL]. (2017-09-25) [2018-07-25]. http://www.siom.cas.cn/xwzx/zhxw/201709/t20170925_4864235.htm.