



DOI: 10.12086/oe.2019.180560

光存储技术发展现状及展望

苏文静^{1,2}, 胡巧^{1,2}, 赵苗^{1,2}, 原续鹏^{1,2}, 郭新军^{1*}, 阮昊¹¹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中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要: 随着互联网、物联网、云计算以及人工智能的快速发展, 人类社会已经进入大数据时代。面对如此多的数据, 如何安全可靠、绿色节能、长寿命、低成本地进行存储已经成为一个重要问题, 传统的光存储技术已经无法满足现实要求, 需要对其加以改造升级, 甚至研发新一代存储技术。到目前为止, 已有多种基于光存储原理的样机研制成功并获得工程应用, 光存储技术不断完善, 正逐步实用化和商用化。本文首先简单介绍了光存储技术领域发展历程, 然后详细列举了其中 8 种具有产业化前景的光存储技术, 对它们的原理及发展现状进行了总结, 并对其技术特点和作为大数据存储介质的前景进行了讨论; 最后对光存储技术未来发展趋势进行了展望, 以期为大数据时代光存储技术的发展提供技术参考。

关键词: 光存储; 大数据; 存储技术; 双光束超分辨

中图分类号: TP333; TN29

文献标志码: A

引用格式: 苏文静, 胡巧, 赵苗, 等. 光存储技术发展现状及展望[J]. 光电工程, 2019, 46(3): 180560

Development status and prospect of optical storage technology

Su Wenjing^{1,2}, Hu Qiao^{1,2}, Zhao Miao^{1,2}, Yuan Xupeng^{1,2}, Guo Xinjun^{1*}, Ruan Hao¹¹Laboratory of Micro-Nano Optoelectronic Materials and Devices, Key Laboratory of Materials for High-Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: With the rapid development of internet, internet of things, cloud computing and artificial intelligence, human society has entered the age of Big Data. In the face of such a large amount of data, how to store it safely and reliably, green and energy-saving, long life and low cost has become an important issue. Traditional optical storage technology has been unable to meet the practical requirements, and needs to be modified and upgraded, or even developed a new generation of storage technology. So far, a variety of prototypes based on the optical storage principle have been successfully developed and applied in engineering. The optical storage technology has been improved continuously and is being applied and used gradually. This paper first briefly introduces the development history of optical storage technology, and then lists eight types of optical storage technologies with industrial prospects in detail, summarizes their principles and development status, and discusses their technical features and prospects as Big Data storage media. Finally, the future development trend of optical storage technology is prospected in order to provide technical reference for the development of optical storage technology in the era of Big

收稿日期: 2018-10-31; 收到修改稿日期: 2019-01-28

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

作者简介: 苏文静(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事光学系统伺服的研究。E-mail: swj1995@126.com

通信作者: 郭新军(1974-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事大数据光存储的研究。E-mail: 42328327@qq.com

Data.

Keywords: optical storage; large data; storage technology; double beam super-resolution

Citation: Su W J, Hu Q, Zhao M, et al. Development status and prospect of optical storage technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(3): 180560

1 引言

光存储技术由于所特有的长寿命、安全可靠和低成本等优点,从二十世纪六十年代开始一经发展就迅速流行^[1],已普及到国民经济的各行各业。直到近些年来,随着全固态硬盘(solid state hard drive, SSD)、硬盘(hybrid hard disk, HDD)等存储技术的快速发展,其存储密度、容量不断增大和成本不断降低,以及网速的不断提高、云存储的普及,经历了数代进步的光盘市场开始不断萎缩。但随着云计算、物联网、人工智能、大数据云存储时代的到来,主流的数据保存方法,例如 SSD 存储存在单位成本高的问题,同样存储容量的 SSD 比 HDD 贵得多;而 HDD 虽然单位成本低,适合做大容量存储,但读写速度远不如 SSD。而且 SSD 和 HDD 寿命都只有 3 年~5 年。磁带库具有存储密度高,成本低的优点,但每 10 年左右就要进行迁移,需要恒温恒湿的保存环境,抵御强电磁场的能力差。在此情况下,面对大数据时代长期保存、低能耗、高可靠的存储要求,光存储技术又开始受到重视和发展^[2]。

探索发展新光存储技术,研究其物理机制,开发核心技术,都会成为推动这门技术的更新换代、开拓新型存储技术市场,不断创新发展的重要驱动力。为此,需要在综述各种光存储技术发展现状的基础上探讨未来光存储技术的发展趋势,以期对本领域技术的重点发展方向提供参考。

2 光存储技术发展现状和趋势

光存储在 20 世纪 60 年代末 70 年代初期开始发展,主要经历了 CD、DVD 和 BD 三代产品的更新迭代。为适应信息量剧增的形势,信息存储正在突破衍射极限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^[3]。

当前光存储技术的存储密度主要受限于二维平面内存储点尺寸,由于衍射极限的存在,光盘容量有限难以大幅提升^[4]。如何突破现有存储技术的不足,满足当今数据时代对海量数据存储的需求成为目前所面临的问题,正因如此,新的光存储技术成为了一个研究热点。

按照产业化发展的程度,可将光存储技术分为三类:已经产业化正在不断完善的蓝光光存储技术,正在研发阶段处于产业化前夜的“多波长多阶光存储技术”、“双光束超分辨率光存储技术”、“全息存储技术”、“玻璃存储技术”,以及处于预研阶段的“荧光纳米晶体存储技术”和“DNA 存储技术”、“近场光存储技术”等 8 类光存储技术,以下是对它们的介绍。

2.1 蓝光光存储技术

使用短波长、高数值孔径物镜的蓝光光盘(blue-ray disc, BD),可在一张单面单层的 12 cm 光盘上存放 15 GB~27 GB 的信息。但由于受到光学系统衍射极限的限制,且目前对更短波长激光器和更大数值孔径透镜的实现成本和技术要求太高,其存储密度也已趋近于理论技术的极限。为了扩大容量及应用领域,多层蓝光存储技术应运而生。多层蓝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^[5-6]。目前多层的 100 GB 蓝光光盘在光盘库已普遍采用,300 GB 蓝光光盘目前已经研制出样盘,正在解决大规模生产的工艺问题,预计 2021 年初量产。由于受记录层透过率的限制,已有研究证明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^[7]。与在线服务的串流服务相比,蓝光光盘的优势在于超高比特率(最高 108 Mbps),而一般在线 4 K 超清串流只有 16 Mbps。

影响光盘存储寿命的光盘原料有三种: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,目前寿命已达到了 100 年以上。

2.2 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,光致变色材料的变色机理:物质吸收光子后,内部电子从分子的一个能级跃迁到另一个能级或者固体中的离子从一个位置转移到另一个位置

并改变它的价态,使其呈现不同的光谱,从而导致光致变色^[8]。同一时刻在光致变色材料中利用不同的激光波长,可实现多波长和多层并行信息存储^[9]。其原理如图1所示,三种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,每一个记录层只会被对应的记录光激发,而对其他层的记录光则透明。例如,当波长为 λ_1 的激光照射光致变色层,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。记录的波段通常选择为780 nm、650 nm、532 nm以及405 nm。

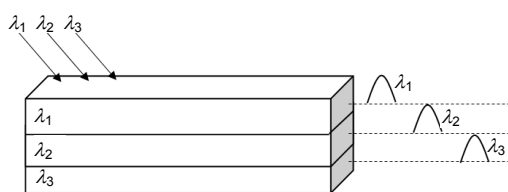


图1 多阶多波长存储原理图

Fig. 1 Multi-level and multi-wavelength storage schematic diagram

清华大学齐国生^[10]等人采用三种二芳基乙烯作为记录媒介,其记录波长分别为532 nm、650 nm和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^[11-12]等人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,存储数据迁移率可增加 $n \times m$ 倍,如清华大学国家光盘工程中心采用3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/cm²,同时数据迁移率可以达到40 MB/s^[13-14]。但多阶多波长光存储存在诸多问题,例如: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。

2.3 双光束超分辨率光存储技术

双光束超分辨率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^[15],其基本原理类似于2014年诺贝尔化学奖得主Hell发明的荧光成像技术,最早于1994年提出^[16]。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“删除”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 TB到1 PB的潜力^[17]。

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,测试了其在超分辨记录中的淬灭特性,模拟得出可达到的最高分辨率为60 nm,并设计了记录和读出的方法^[18]。但二芳基乙烯这种有机光致变色材料存在随时间增加,光学态发生转化的缺陷,会造成信息误码率增加,故需要研发稳定性更好的新型超分辨记录材料。

2.4 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,这一重要性质使得光学成像分辨率有可能提高几十倍甚至上百倍;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^[19]。

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/in²(1 in=2.54 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^[20],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,也导致近几年研究陷入低潮。

2.5 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,能够保存其完整的空间相位信息^[21]。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^[22]。

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^[23],其中 λ 为记录光波长。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发展空间。体全息高密度存储所涉及的关键技术和研究现状在文献^[22]中有详细的描述。

相对于磁存储、电存储以及传统的光存储等几种现行的存储技术,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(linear tape open)相比,全息存储在成本与传输速率方面有明显优势^[24]。但由于全息存储尚未突破衍射极限,所以其密度的提升还是有一定的限制。

2.6 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^[25]。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。该项技术采用熔融石英材料,利用飞秒激光直写技术在石英内部形成“纳米光栅”的双折射结构来保存信息,利用双折射显微镜即可读取信息。与传统光盘不同的是,石英玻璃存储读取时采用透射光路而非反射,穿过被测存储单元后,读取光包含了双折射的慢轴角度、光程延迟值等信息,加上石英玻璃的三维空间,一共五个复用维度。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,耐热温度可以达到 1000 °C,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^[26]。

2.7 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^[27],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。

2.8 脱氧核糖核酸(DNA)存储技术

脱氧核糖核酸(DNA)存储技术利用 DNA 中的四种碱基腺嘌呤(A)、胸腺嘧啶(T)、鸟嘌呤(G)和胞嘧啶(C)代表二进制数据(胸腺嘧啶(T)和鸟嘌呤(G)=1,腺嘌呤(A)和胞嘧啶(C)=0)^[28],将二进制的文件映射成 DNA 中的碱基序列,最后通过人工合成技术形成长链的 DNA 以实现大数据的存储,通过特定的密钥,可将 DNA 信息逆转换为二进制数据,进行读取。DNA 存储技术的显著优点为容量大、存储时间长、能耗低、运营成本低、不涉及兼容问题等,但其初期投资成本

较大。

Catalog 公司正在研究通过包含 20 到 30 个碱基对的 DNA 片段记录数据,数据存储在 DNA 片段的排列中,片段之间用酶缝合;该方案预计会有效降低 DNA 存储技术的成本。英国创业公司 Evonetix 致力于开发能够在硅阵列上并行合成 DNA 的技术。该技术基于一种新型硅阵列,采用半导体微加工技术制造,能够独立控制 1 万个小型化反应点,实现大规模并行性,吞吐量非常高,错误率低于十亿分之一。美国公司 Molecular Assemblies 开发的酶促 DNA 合成技术,能够为工业合成生物学、个性化治疗、精确诊断,以及信息存储、纳米技术等领域的产品提供动力。法国创业公司 DNA Script 公司专注于使用专有的无模板技术制造合成 DNA。通过快速、经济和高质量的 DNA 合成技术,大大加速新疗法、可持续化学品生产、改良作物以及数据存储等新应用的开发。公司特有的酶促技术和核苷酸化学合成平台,可以合成更高纯度的更长的 DNA 序列,使序列的精确性提高 500 倍,合成速度更快,耗时缩短 50 倍。

3 光存储技术展望

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,从 2018 年到 2019 年将有一个很大的突破点^[29],如单个光盘存储容量将达到或超过 500 G,并不断降低存储成本。预计在 2022 年左右与光存储相关的单项技术和系统集成技术将达到稳定,并使得存储购买成本达到或低于 1 美分/GB。

未来光存储技术研究将主要围绕两个大的方向并行:新的存储方式工程化和研发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技术和玻璃存储技术。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 到 10 年内,光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,在各行各业普及高性能低成本大数据光存储。

参考文献

- [1] Ding D Y, Gu M F, Liang Z C. The Progress of Optical Storage[J]. *Journal of Jinling Institute of Technology*, 2004, **20**(4): 17-21.

- 丁冬艳, 顾敏芬, 梁忠诚. 光存储技术的进展[J]. 金陵科技学院学报, 2004, **20**(4): 17-21.
- [2] Zheng C X. Research Progress of Optical Storage Technology[J]. *CC News*, 2009(9): 20-23.
郑晨溪. 光存储技术研究进展[J]. 信息系统工程, 2009(9): 20-23.
- [3] Xu D Y. Progress in basic research on optical storage technology in China[J]. *China Mediatech*, 2006(4): 22-24.
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): 22-24.
- [4] Zhang D L, Tang Q B, Shi D H. Technology development of high density optical data storage[J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(4): 4-7.
张东玲, 汤清彬, 施德恒. 超高密度光存储技术[J]. 激光杂志, 2006, **27**(4): 4-7.
- [5] 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.
- [6] Yan M M. Analysis on the driver design of multi-layer Blu-ray disk[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.
- [7] Ruan H, Bu C Y. Multilayer optical storage for big data center: by pre-layered scheme[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, **8913**: 891308.
- [8] Bo B, Neimule M, Du J, et al. Applications of organic photochromic materials in all-optical switching[J]. *Optical Communication Technology*, 2012, **36**(4): 57-60.
薄斌, 门克内木乐, 杜娟, 等. 有机光致变色材料及其在全光开关中的应用[J]. 光通信技术, 2012, **36**(4): 57-60.
- [9] Xu D Y, Hu H, He L. Multi-wavelength and multi-level optical storage based on photochromic materials[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5966**: 596607.
- [10] 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, 刘嵘, 等. 光致变色二芳基乙烯多波长光存储研究[J]. 物理学报, 2004, **53**(4): 1076-1080.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Xu D Y. *Super-density and Super-speed Optical Data Storage*[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2009.
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.
- [15] Cao Y Y, Xie F, Zhang P D, et al. Dual-beam super-resolution direct laser writing nanofabrication technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(12): 1133-1145.
曹耀宇, 谢飞, 张鹏达, 等. 双光束超分辨激光直写纳米加工技术[J]. 光电工程, 2017, **44**(12): 1133-1145.
- [16] Hell S W, Wichmann J. Breaking the diffraction resolution limit

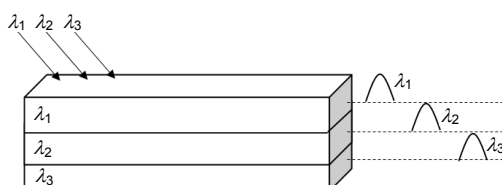
- by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy[J]. *Optics Letters*, 1994, **19**(11): 780–782.
- [17] Gu M, Li X P, Cao Y Y. Optical storage arrays: a perspective for future big data storage[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, **3**(5): e177.
- [18] Liu T C, Zhang 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. 二芳基乙烯的光学性质及其在超分辨率存储中的应用[J]. *中国激光*, 2018, **45**(9): 0903001.
- [19] 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.
- [20] Hong T, Wang J, Li D C. The application of near-field optics in high density data storage[J]. *Optical Technology*, 2001, **27**(3): 000255–259.
洪涛, 王佳, 李达成. 近场光学在高密度存储中的应用[J]. *光学技术*, 2001, **27**(3): 000255–259.
- [21] Tan X D. Optical data storage technologies for big data era[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(9): 19–22.
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): 19–22.
- [22] 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.
- [23] Van Heerden P J. Theory of optical information storage in solids[J]. *Applied Optics*, 1963, **2**(4): 393–400.
- [24] Anderson K, Ayres M, Sissom B, *et al.* Holographic data storage: rebirthing a commercialization effort[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9006**: 90060C.
- [25] Xu M J. Hitachi introduced quartz glass data storage technology to permanently store data[J]. *Glass & Enamel*, 2012(6): 49.
徐美君. 日立推出石英玻璃数据存储技术可永久保存数据[J]. *玻璃与搪瓷*, 2012(6): 49.
- [26] Lv X Y. Laser transforms glass into a new type of memory that can safely store information for thousands of years[J]. *Modern Science*, 2011(19): 128–130.
吕晓洋. 激光让玻璃变身新式存储器可安全存储信息几千年[J]. *今日科苑*, 2011(19): 128–130.
- [27] Riesen N, Pan X Z, Badek K, *et al.* Towards rewritable multilevel optical data storage in single nanocrystals[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(9): 12266–12276.
- [28] Shen J J, Lv H B. Design of DNA random access memory[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2005, **32**(5): 540–545.
沈俊杰, 吕红兵. DNA 随机存储器的设计[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2005, **32**(5): 540–545.
- [29] 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.

Development status and prospect of optical storage technology

Su Wenjing^{1,2}, Hu Qiao^{1,2}, Zhao Miao^{1,2}, Yuan Xupeng^{1,2}, Guo Xinjun^{1*}, Ruan Hao¹

¹Laboratory of Micro-Nano Optoelectronic Materials and Devices, Key Laboratory of Materials for High-Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



Multi-level and multi-wavelength storage schematic diagram

Overview: With the rapid development of internet, internet of things, cloud computing and artificial intelligence, human society has entered the era of Big Data. In the face of so much data, how to store it safely, reliably, green and energy-saving, long life and low cost has become an important issue. Traditional optical storage technology has been unable to meet the practical requirements, and it needs to be transformed and upgraded, or even to develop a new generation of storage technology. At present, the storage density of optical storage technology is mainly limited by the size of recording points in the two-dimensional plane. How to break through the shortcomings of the existing storage technology and meet the demand of mass data storage in today's data era has become the current problem. For this reason, the new optical storage technology has become a research hot spot. So far, a variety of prototypes based on optical storage principle have been researched and developed in engineering. Optical storage technology has been continuously improved and is gradually being applied and commercialized. This paper firstly introduces the development history of optical storage technology, and then lists 8 kinds of optical storage technology with industrialization prospect in detail. They are blue light optical storage technology, multi-wavelength and multi-level optical storage technology, dual-beam super-resolution optical storage technology, near-field optical storage technology, holographic storage technology, glass storage technology, fluorescent nanocrystal storage technology and DNA storage technology. Then their principles and development status are introduced and summarized, and their technical characteristics and prospects as Big Data storage media are discussed. Through the introduction and comparison, we hope to find out their development prospects and suitable development direction in the future optical storage industry. Finally, the future development trend of optical storage technology is prospected and a conclusion is drawn. In the future, the research on optical storage technology will mainly focus on two major directions: the engineering of new storage methods and the development of storage medium materials with better performance. At present, the most promising engineering is double beam super-resolution technology and glass storage technology. All kinds of storage technologies aim to improve storage capacity, density, reliability and data transmission rate. Therefore, in the next five to ten years, the development trend of optical storage technology still aims at cloud storage products with super-large capacity, ultra-high efficiency, low cost and wide compatibility. This paper is expected to provide technical reference for the development of optical storage technology in the era of Big Data.

Citation: Su W J, Hu Q, Zhao M, *et al.* Development status and prospect of optical storage technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(3): 180560

Supported by Scientific Research Program of Shanghai Science and Technology Commission Fund (16DZ1100302, 16511101600, 17DZ2201600)

* E-mail: 42328327@qq.com