

体全息存储研究现状及发展趋势

李建华^{1,2}, 刘金鹏³, 林 泉³, 刘佳琪^{1,2}, 谭小地^{3*}

¹试验物理与计算数学国家重点实验室, 北京 100076;

²北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076;

³北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 以历史为引线, 综述了体全息存储技术的研究历史、现状和未来的发展趋势。列举了体全息存储原理、特点以及国内外体全息存储的发展历程。分别介绍了体全息存储驱动器结构、存储材料、信道处理的关键技术的现状, 并对相位型及偏振型体全息存储的最新进展进行了展望。对阻碍体全息存储实用化的技术问题进行了分析, 认为页面串扰噪声、材料散射噪声、材料收缩是限制存储密度的 3 个瓶颈问题, 是后续研究需要重点解决的问题。

关键词 光数据存储; 全息; 体全息存储

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1000001

Volume Holographic Data Storage

Li Jianhua^{1,2}, Liu Jinpeng³, Lin Xiao³, Liu Jiaqi^{1,2}, Tan Xiaodi³

¹National Key Laboratory of Science and Technology on Test Physics & Numerical Mathematics, Beijing 100076, China;

²Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China;

³School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The history, present situation and future development trend of volume holographic storage technology are reviewed based on the timeline. The principle and characteristic of volume holographic data storage are introduced and the development process at home and abroad is summarized. Then key techniques such as driver technology, recording materials, channel processing technology are summarized respectively. The Latest development of phase encoded and polarization volume holographic data storage is introduced. Finally, the technical problems that affect the practical application of volume holographic storage are analyzed. It is considered that the inter-page crosstalk noise, the material scattering noise and the material shrinkage are the three bottlenecks that limit the storage density, which need to be solved in the follow-up study.

Key words optical data storage; holography; volume holographic data storage

OCIS codes 210.2860; 210.4810

1 引 言

科技的发展正将人类从信息技术(IT)时代带入数据技术(DT)时代。据美国国际数据公司(IDC)统计, 未来几年全球数据量将每两年翻一番, 在 2020 年将达到 40 ZB(Zetta Bytes, 10^{21})^[1], 用 1 TB(Tera Bytes, 10^{12})容量的硬盘来保存这些数据需要 400 多亿张。海量数据的存储与维护成本将会越来越大, 高密度、高速率、低功耗、长寿命的存储技术成为社会的重大需求。

在现有的信息记录方法中, 电、磁等存储技术采用二维表面存储方式, 其存储密度受限于存储点的尺寸。随着技术的不断发展, 目前该尺寸已逐渐趋近其技术极限, 进一步提高存储密度将面临极大的技术挑战。与

收稿日期: 2017-04-14; **收到修改稿日期:** 2017-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(61475019)

作者简介: 李建华(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事全息存储、光电探测、星敏传感器研制等方面的研究。

E-mail: lijh14@163.com

* 通信联系人。E-mail: tan@bit.edu.cn

电、磁存储技术相比,光信息存储特别是体全息存储^[2-8],以光波作为载体,具有振幅、偏振、相位等多个特征参量,以及将二维表面存储发展为多维度高密度存储的潜在优势,有望突破现有存储技术的不足,满足当今信息时代对海量数据存储的需求。

将光全息技术用于数据存储的想法始于 20 世纪 60 年代^[9],到目前为止,已有多种基于体全息存储原理的样机研制成功^[10-15],体全息存储技术正逐步向实用化和商用化方向迈进。本文对体全息存储的发展历史进行简要回顾,并对关键技术的研究现状进行梳理,分析体全息存储的发展趋势,为该技术的发展提供一些参考。

2 体全息存储技术特点及发展历史

2.1 存储原理

全息存储与全息照相原理类似,涉及两个过程和两路光波。两个过程为干涉记录与衍射读取,两路光波为参考光和信号光,如图 1 所示。记录时,参考光与信号光在存储介质中相遇并发生干涉,光场同时与存储介质发生作用,改变介质的光学性质,比如折射率分布,从而将信号光的信息以体全息光栅的方式记录在介质中。信号光可以用空间光调制器(SLM)把需要存储的数据页(data page)或图片编码调制在光场中。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。

体全息高存储密度的实质来源于复用技术。由于数据以体全息光栅的形式记录,利用体全息光栅的布拉格选择性,可以在存储介质的同一位置利用不同的参考光存储多组数据,而且每个数据页都可以独立读出。常用的复用技术包括角度复用^[16]、波长复用^[17]、相位复用^[18]、移位复用^[19-20]、散斑复用^[21]。图 1 演示的是角度复用,即通过改变参考光的入射角度便可在相同的位置存储多组数据。

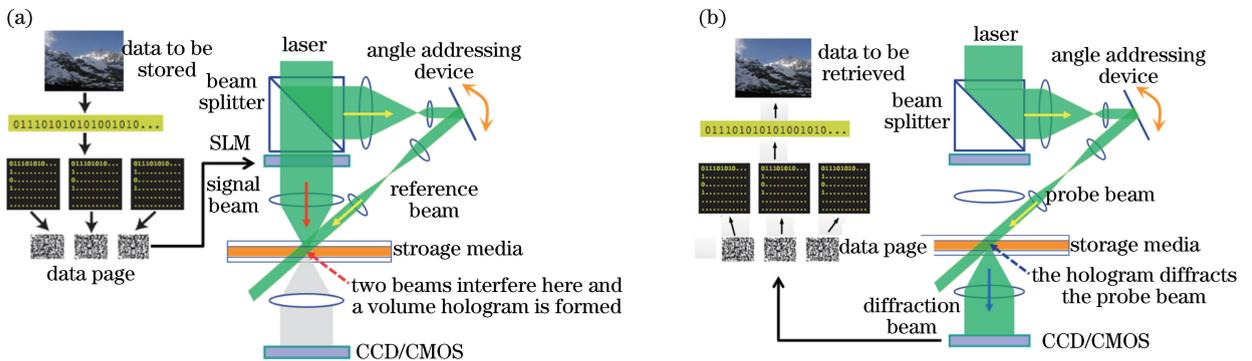


图 1 体全息记录与读取原理示意图。(a)记录过程;(b)读取过程

Fig. 1 Diagram of volume holographic data storage for recording and reading data. (a) Recording data process; (b) reading data process

2.2 技术特点及优势

从上述存储原理可以看到,体全息存储技术有两个显著特点:体式存储与并行读写。体式存储是指数据以体全息光栅的形式存储在介质的一定体积内。利用体光栅的布拉格选择性,可以将多组数据记录在存储材料的同一位置,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^[9],其中 λ 为记录光波波长。对于 1 mm 厚的材料,其等效面存储密度可达 40 Tb/in^2 ^[5],其中 $1 \text{ in}=25.4 \text{ mm}$ 。并行读写是指信息以数据页为单位进行读写,因而可具有极高的数据传输率,其极限值主要由光电与光电转换器件(SLM 及 CCD)来决定,数据传输率将有望达到 1 GB/s 。此外,体全息存储技术还具有关联寻址的特点,可用于地形匹配、图像识别等领域^[22]。

目前广泛使用的存储方式主要有 3 种:以固态硬盘为代表的半导体存储、以机械硬盘为代表的磁存储、以 DVD 为代表的光存储。固态硬盘近年来获得了广泛的应用,市场份额急速飙升,有取代机械硬盘之势,许多公司的大规模存储系统已经广泛使用固态硬盘作为底层存储设备^[23]。其优点是读写速度更快,但存在

擦写次数有限和电荷流失等缺点,不适合数据的长期保存,而且也面临存储密度提升(550 Gb/in²)受限的问题。基于磁存储机制的存储技术,不仅存在寿命有限的问题(硬盘 5 年),而且数据存储于磁盘表面的二维平面内,存储密度(735 Gb/in²)已经趋近于其技术的理论极限。光存储较其他存储方式具有节能和保存时间长等优点,脸书公司对目前多种存储技术的对比研究也表明光存储在数据长期保存成本和能耗方面极具优势,于 2016 年 1 月宣布与日本松下合作研发光存储技术,存储长期不用并很少访问的数据(冷数据),以降低海量数据的存储成本。但是基于光盘表面二维点阵排列方式的传统光存储技术,如 DVD 和蓝光 DVD,由于光学系统衍射极限等原因,其存储密度(25 Gb/in²)也已趋近于理论极限,前途并不明朗。

总结现有的存储技术可以看到,它们均为二维面式存储,每一数据比特占据一定的空间面积,存储密度取决于记录点尺寸。读取方式大多采用逐点扫描的串行方式,传输速率受限于存储器的转动速度。半导体存储的读写虽以物理页(page)作为最小单元,但其大小较小,通常为 4 kB 或 2 kB^[24]。体全息存储作为新一代存储技术,相对于现行的几种存储技术,在存储密度和读取速度方面都具有很大的提升空间,有望突破现有存储技术的极限,从而满足当今信息时代对海量数据存储,特别是冷数据存储的需求。

各种存储方式的特性比较见表 1,除了与现行技术相比外,面向未来,体全息存储与其主要竞争对手——开放磁带技术(Linear Tape Open)相比,体全息存储在成本与传输速率方面有明显优势^[25]。

表 1 各种存储方式比较
Table 1 Comparison of different data storage technologies

Data storage technology	Storage type	Archive life	Access method	Energy cost	Density increase potential
Semiconductor storage	Two dimension	Short	Two dimension	Low	Small
Magnetic storage	Two dimension	Short	One dimension	High	Small
Traditional optical storage	Two dimension	Long	One dimension	Low	Small
Volume holographic data storage	Three dimension	Long	Two dimension	Low	Large

2.3 体全息存储技术发展历史

全息术本质是一种光波记录方法,将全息术用于数据存储的设想最早由 van Heerden 于 1963 年提出^[9]。该技术利用的是“体”而不是“面”存储数据,对材料的利用比现今广泛采用的面存储多出了一个尺寸维度,有显著提高存储容量的潜力,掀起了体全息存储技术的研究热潮。但是由于当时缺乏理想的存储材料和光电输入输出设备,进展缓慢,并没能研制出相应的系统。

进入 20 世纪 90 年代,体全息存储系统中的器件、材料、复用方法、寻址技术、信道技术等取得了飞速进展,人们普遍认为体全息存储技术实用化的时代已经到来,国内外大量的研究机构纷纷投入大量人力物力开展研究。1995—2000 年,在美国国家存储工业联合会主持下,由美国国防部高级研究计划局(DARPA)、IBM 公司的 Almaden 研究中心、斯坦福大学等共 12 个单位联合成立了协作组织,投资约 7000 万美元,实施了光折变材料(PRISM)和体全息数据存储系统(HDSS)项目。在这两个项目的支持与带动下,许多体全息存储与应用系统先后问世,并有专著出版^[4]。

进入 21 世纪,体全息存储技术逐步走出了实验室研究阶段,开始迈向实用化和商用化。在巨大的市场推动和需求牵引下,通用、索尼、日立等大公司纷纷开展体全息商用化的研究,美、日等国也先后出现了以体全息存储为核心技术的商业化公司,如美国的 InPhase(现在为 Akonia Holographics, <http://akoniaholographics.com>),日本的 Optware 等,并推出了原理样机。比如美国 InPhase 公司 2004 年推出体全息存储系统样机 TapestryTM^[26],日本 Optware 公司于 2004 年基于同轴全息存储技术开发了 CollinearTM Holography 全息存储系统^[11],美国通用电气公司于 2009 年推出了具有 500 GB 容量的微全息存储聚合物光盘系统^[27]。

国内方面,2004 年,清华大学以开环阳离子聚合物(CROP)为存储介质开发了体全息光盘存储实验系统,并分别在 2006 年和 2009 年构建了正交偏振双通道存取系统^[28]和大容量体全息光盘存储系统^[29]。2012 年,还构建了共光轴体全息系统^[30],通过参考光模式复用技术把移位复用间隔从 4.5 μm 减小至 1.5 μm^[31]。北京工业大学也研制了以晶体材料为记录介质的容量盘式全息存储系统^[32],在同一晶体中分 4 批存储,固定了 5000 幅高分辨率全息图,实现了非易失性存储,体存储密度达到 10 Gb/cm³,并出版了体全息存储技

术专著^[8]。

从发展历程来看,体全息存储技术在基础理论研究及工程样机研制方面都取得了令人鼓舞的成就,但离真正的实用化还有一定的距离,关键技术还需要进一步创新和突破。

3 体全息存储关键技术及研究现状

体全息高密度存储的本质是复用,复用存储的性能涉及到驱动器方案及材料的性能。不同的驱动器结构能够使用的复用技术以及寻址空间不同,而每幅全息图的质量则很大程度上取决于材料的特性。目前常用的是角度复用和移位复用。除了驱动器与材料等硬件层面外,还需要研究针对体全息存储的噪声抑制技术,也就是信道技术。

3.1 驱动器技术

近年来,体全息存储研究主要集中在3种结构中:1)同轴,以 Optware 公司的 Collinear Holography 为代表;2)双轴,以 InPhase 公司的 Angle-Polytopic 相位共轭结构为代表;3)InPhase 公司的 Monocular 结构。其中同轴的特点是结构紧凑,稳健性好;双轴的特点是可以使用平面波进行角度复用,具有一定的补偿材料收缩的能力;Monocular 结构综合了同轴与双轴结构的特点,既使用平面波进行角度复用,又让参考光与信号光经过共同的光学读写头,以达到结构紧凑的目的。

3.1.1 同轴存储结构

由前述可知,体全息存储涉及参考光和信号光两路,比现有光盘技术多了一路,带来系统复杂、体积大、稳定性差等问题。为了提高系统的稳健性以及减小系统的尺寸,日本 Optware 公司于 2005 年首次提出同轴式全息存储^[11]概念,随后德国公司及日本三星横滨研究院均提出共光路^[33-34]概念,索尼于 2007 年提出了共轴概念^[35]。这些结构的共同特点是参考光与信号光通过共同的光学读写头,便于系统实现集成化,此外还有利于提高系统抗环境振动、抗空气扰动干扰的能力。同轴全息存储采用共同光学读写头,并进一步让参考光与信号光同轴,而且均由 SLM 调制,结构更加紧凑。

同轴存储的核心理念是将一条光路分割为两部分,一部分作为参考光,一部分作为信号光。双光轴系统与同轴系统对比如图 2 所示,可以看到同轴系统布局明显紧凑。记录时,SLM 加载的图像数据如图 3(a)所示,光束的外部作为参考光,中心区域为信号光,两者在物镜的焦面附近相遇并完成干涉记录。读取时,只有参考光区域上载数据,有光透过,形成参考光,而此时信号光部分上载“0”,SLM 对应区域不透光,如图 3(b)所示。参考光照射全息光盘,形成衍射光,经介质底面的反射层后,再次通过 1/4 波片和偏振分束器(PBS),由 CCD 探测读出。反射层带有寻址和伺服信息,与光盘/数字化视频光盘(CD/DVD)技术兼容,应用于现有光盘技术的伺服机构可以直接借鉴过来使用。

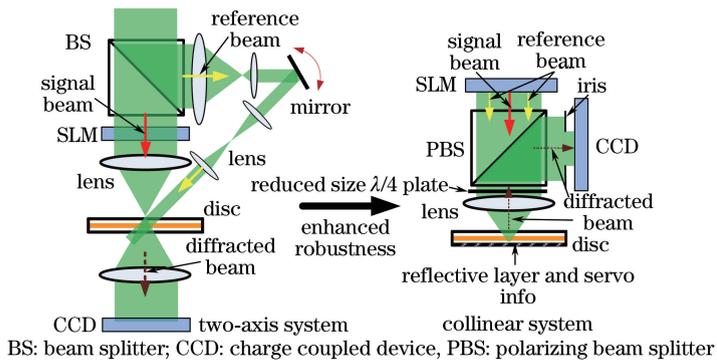


图 2 双光轴系统与同轴系统对比

Fig. 2 Comparison of two-axis and collinear systems

正因为同轴结构有显著的优点,该方法一经提出就受到广泛关注,已成为体全息实用化的重要发展方向。对于同轴系统,最初报道的复用方法一般为移位复用^[36],受限于最小移位复用间隔的限制,系统实际能够达到的存储容量远小于理论极限值,体全息的高存储密度优势未能得到充分展示。考虑到参考光模式也

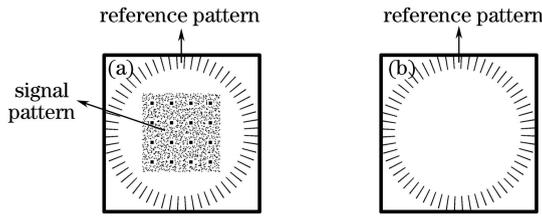


图 3 SLM 加载的图像数据。(a)记录时;(b)读取时

Fig. 3 Pattern updated on SLM for data. (a) Recording; (b) reading

由 SLM 调制,清华大学研究团队提出了参考光模式调制移位复用方法^[31]。每存储一组数据后,移动存储介质的同时改变参考光模式,在移位选择性的基础上引入布拉格选择性,增强了存储的选择性,可以减小移位间隔,为高密度存储提供了一个新的方法。随后还提出了正交模式复用方法,使用正交模式与随机相位板,可在相同位置复用存储,提高读写速度^[37]。

3.1.2 双轴存储结构

从前述可知,同轴系统的参考光不是平面波。由于 SLM 上每个像素经物镜后可对应一束平面波,因此参考光可以看成是不同传播方向的平面波的叠加,这给光栅理论建模分析增加了难度,而采用平面波为参考光则能降低建模难度。另外,同轴系统的参考光模式会影响再现图质量,引入页内串扰^[38-39],而平面波记录则不存在这个问题,而且基于平面波的角度复用有利于补偿材料收缩的问题^[5]。基于上述几点考虑,InPhase 公司采用双光轴系统,使用平面波作为参考光,并采用角度复用,开发了对应的原理样机,结构如图 4 所示^[5]。

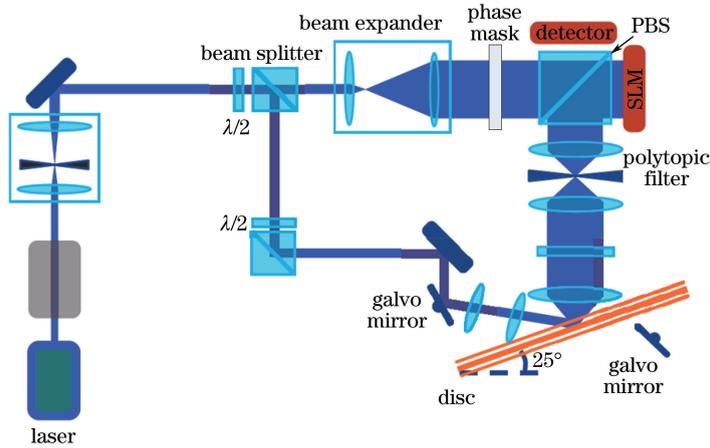


图 4 InPhase 的多角度相位共轭存储结构

Fig. 4 Multi-angle phase conjugate memory structure of InPhase

为了解决角度复用存在寻址空间受限的问题,InPhase 公司提出了 polytopic 复用方式^[40],在 SLM 的傅里叶谱面位置增加 polytopic 滤光片,只让再现信号光中的一个通过,增加角度复用寻址空间。如果不用该滤光器,一个平面波同时读出的多个信号光会互相干扰。为了让整个光学系统布局在存储材料的同一侧,InPhase 还在 polytopic 复用的基础上使用了共轭读取方式。

系统的工作原理如下:记录时,激光由光束分束器分为参考光和信号光,参考光为平面波,信号光光路扩束后经过相位板,相位板刚好成像在 SLM 表面,可以匀化 SLM 傅里叶谱面的光强分布。采用反射式 SLM,光束经过 SLM 后偏振态改变,再经过 PBS 后反射向下,中间经过一个 polytopic 滤光片,只让 SLM 的中心衍射级次透过,最后在材料内部与参考光干涉完成记录。改变反射镜的角度可在存储介质的同一位置实现角度复用,通过改变材料位置可以再次进行存储,使用 polytopic 滤光片可以让这个位置的改变量变小。读取时,只有参考光照射,同时改变参考光的偏振态,利用图 4 中右下角的反射镜反射回来的参考光照射存储介质,基于相位共轭原理读出信号,最终成像在探测器上。

文献^[5]对该驱动结构进行了详细描述。样机可实现 300 GB 的存储容量和 20 MB/s 的读写速度,在每

个位置可以角度复用 320 组数据。

3.1.3 Monocular 存储结构

Monocular 存储结构最早由 InPhase 和日立公司于 2008 年联合提出^[41], 后来因 InPhase 业务调整, 相关技术由 Akonia Holographics 公司继承, 其存储结构如图 5 所示^[5]。参考光与信号光共同通过相同的物镜, 通过改变参考光光路的摆镜角度, 可以实现角度复用。2015 年, 通过优化材料配方, 采用动态口径复用、零差探测法以及 90°相差复用等方法, 该结构实现了 2 Tb/in² 以上的存储密度^[42]。

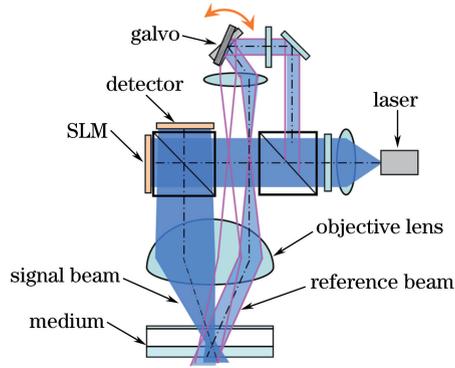


图 5 Monocular 存储结构

Fig. 5 Storage structure of monocular

3.2 体全息存储材料

体全息存储材料是存储系统的一个核心组成部分, 其性能决定再现图像的质量, 甚至可以认为材料是体全息存储能否实用化的关键。理想的存储材料需具备如下特点: 1) 反应速度快, 能快速完成全息的记录; 2) 调制度高, 动态范围大, 再现图的衍射效率高; 3) 再现图像保真性能好; 4) 非易失性, 后续的全息记录及读取不会破坏已记录的全息图; 5) 环境适应性强; 6) 存储寿命长。

3.2.1 常用存储材料机理与特点

早期研究常用无机光折变材料(如 LiNbO₃ 晶体)进行演示, 其存储原理为光折变效应。记录光场和介质的相互作用使得晶体内部形成与记录光强空间分布对应的空间电荷场; 该电荷场通过电光效应, 在晶体内部形成折射率的空间调制(相位光栅), 从而完成信息的记录。由于该类材料存在记录速度慢、调制度不高、有易失性等问题, 研究焦点很快转移到了光致色变、光折变聚合物、光致聚合物等材料方面。

光致色变材料(光致各向异性材料)^[43-46]是一类利用分子双稳态转换过程中折射率和吸收系数的变化来记录信息的有机材料, 具有可重复擦写与偏振响应特性, 可用于偏振全息记录, 但衍射效率较低, 典型厚度为 20~200 μm, 热稳定性、抗疲劳特性对存储效果影响较大。

光折变聚合物存储原理与光折变晶体材料类似。不同的是光折变聚合物在进行全息记录时需加载较高的外界电场(典型值为 50 V/μm), 其较为合适的厚度仅为 100~300 μm, 限制了体全息存储容量。此外, 光折变材料内在具有的易失性制约了其在全息存储上的应用。

光致聚合物一般包含单体、光敏体系、成膜剂等成分, 光致聚合是指在光源辐照的作用下低分子质量物质合成高分子聚合物的化学反应过程。能形成聚合物的低分子质量的物质称作单体。在两束相干光照射下, 干涉光场在材料内形成周期性光场。光场亮区域引发的光致聚合效应不断消耗光敏剂和单体分子, 由于暗区域光强较弱, 消耗的光敏剂和单体分子较少, 在亮暗区域会形成光敏剂和单体分子的浓度差。为消除浓度差, 保持化学势能平衡, 暗区域的光敏剂和单体分子会向亮区域迁移并不断聚合生成聚合物, 当单体浓度降低到一定水平时, 光致聚合反应会终止, 这样在光照亮区域主要为光致聚合产物, 而暗区域为黏结剂。两者的折射率差别使材料内部形成体全息光栅。

这种由聚合产生的折射率调制与由电荷分布产生的调制相比, 具有非易失性的特点。光致聚合物的典型厚度为 20 μm~2 mm, 具有高灵敏度、高衍射效率、无需后续处理等特点, 且其制备成本低、加工方便、稳定性较好。

3.2.2 光致聚合物材料

鉴于光致聚合物的优良性能,美国的 Aprilis 和 InPhase、日本 Optware 等公司纷纷基于光致聚合物材料推出了只读全息光盘,台湾交通大学也研制了 PQ/PMMA 聚合物材料^[47]。

无论是 InPhase 的 Tapestry 300R^[5] 光致聚合物材料还是 PQ/PMMA,均采用了双聚合物模式,其中一种聚合物用于形成材料的基底,决定材料的热膨胀系数、光学特性等,另一种聚合物均匀分布在基底中,在光照下完成光致聚合,用于实现折射率调制。两种聚合物“正交”,即材料某些性能只由其中一种聚合物决定,可对材料指定参数进行调整而不影响其他性能,大大提高了材料的选择范围,增加了设计灵活性。基底材料折射率既可以大于也可以小于光致聚合材料折射率,形成折射率调制。然而实践中发现,具有较好光敏特性的基底材料往往折射率偏小,因此光致聚合材料主要选用大折射率材料,比如芳族化合物。

聚合物材料制备中主要有以下几个难点。1) 动态范围与反应速度的协调。具有大折射率官能团的单体往往分子质量大,但是分子质量太大会导致扩散速度慢,表现为反应速度慢。2) 动态范围和收缩率的矛盾。一般光折变调制度越大,由聚合反应导致材料收缩会越严重。材料收缩会引入布拉格失配,导致读出信号失真。一般而言,全息存储对材料的收缩率要求小于 0.1%,这给材料的制备提出了严重挑战。针对收缩问题,人们提出了使用纳米颗粒来增加聚合物的调制度的方法^[48-49],但纳米颗粒增加了材料的散射。此外,环境温度变化导致材料膨胀收缩同样会影响系统性能,是系统实用化的一个障碍,否则系统只能用于恒温环境。

在材料制备方面,Akonia Holographics 公司报道了其最新进展,使用名为 DRED 的配方,厚度为 200 μm 的材料调制度可达 24,1.5 mm 材料厚度的调制度可达 180,比之前的双聚合物模式高了 6 倍,而且材料的收缩率小于 0.1%,能够满足使用要求^[42]。

3.2.3 全息记录的光化学动力学特性

在体全息存储中,存储材料的折射率调制特性直接决定了存储性能;而从本质上讲,折射率调制特性取决于记录过程中记录光场与介质相互作用的动力学特性(包含作用机理和速率两个重要方面)。因此,分析动力学特性是探讨材料存储性能的基础和首要任务,可为全息材料存储性能的改善提供有效的理论指导。

全息记录过程伴随材料内部各组分的时域变化和空域变化而变化。时域变化的动因是光吸收造成的光化学反应过程;而空域变化的动因是材料内部组分的浓度梯度场,其外在因素是全息记录光场的空间强度调制。空域变化的存在使得全息记录过程的光化学动力学不同于普通均匀光照射条件下的光化学动力学。

全息记录过程中的单体扩散模型最早由 Colburn 于 1971 年提出^[50],之后 Zhao 等^[51]对典型的光致聚合反应过程进行了分析。亮暗区域消耗单体速率不同,形成单体浓度差,使单体从暗区域扩散到亮区域,给出了基于扩散模型的光致聚合动力学模型:

$$\frac{\partial U(r,t)}{\partial t} = \nabla \cdot [v_1(r,t) \nabla U(r,t)] - v_2(r,t)U(r,t), \quad (1)$$

式中 $U(r,t)$ 为单体分子的空间和时间分布, $v_1(r,t)$ 为单体的扩散速率, $v_2(r,t)$ 为材料的聚合速率。(1)式右侧第一项表明了单体浓度梯度场对光化学动力学过程的影响,第二项为光化学反应项,表明光化学聚合速率。其中光聚合过程往往因材料而异,其特性是决定材料最终动力学特性的主要因素。

经过光照时间 t 后,材料内部聚合物浓度的空间分布可表示为

$$N(r,t) = \int_0^t v_2(r,t')U(r,t)dt'. \quad (2)$$

该模型考虑单体扩散速率与聚合速率之间的关系,根据材料成分浓度与折射率之间的关系可以得到最后的衍射效率等特性,是研究光致聚合反应的经典模型^[52]。但该模型只初步描述光致聚合过程,后续的研究对模型进行了完善^[53-54],考虑了聚合级次及材料链聚合的弛豫等。动力学方程的难点在于方程中的参数难以独立测量,而且相关参数随着反应的推进不断变化,因此光化学模型的验证是一个难点。

3.3 信道处理技术

体全息的存储与读取过程难免会引入噪声,导致数据失真。噪声包括数模和模数转换噪声、电气噪声、材料缺陷噪声、数据页内与页间串扰、光学系统噪声、温度变化以及盘片运动带来的噪声等^[55]。衡量数据失真程度的一个常用指标是误码率。信道处理的目的是通过各种手段尽可能降低记录和读取噪声,保证数据

的误码率满足用户需求(一般要求在 10^{-12} 以内)。信道处理的手段主要有存储信道优化、后处理、信道编码等。其中信道优化偏重于对系统的硬件层面进行优化,后处理则偏重于补偿硬件的问题,而信道编码则通过牺牲一定的存储容量来将系统误码率降至实用水平,实际应用中需要选择合适的编码参数,在误码率与存储容量之间作折中处理。

信道优化常用的技术途径有完善光学系统、高精度匹配输入输出像素、优化选择系统参数、精密伺服控制等^[56-57]。比如,为了提高存储密度,常常引入相位板来匀化谱面实现材料动态范围的充分利用,参见图4中相位板;为了避免使用随机相位板,充分利用材料的动态范围,人们提出引入高通滤波器去除谱面直流分量以及采用零差探测法抑制光学噪声^[58-59]。后处理则包括均衡化和像素失配补偿、过采样等^[60-61]。信道编码包括数据交织^[62]、数据页编码^[63]、纠错码^[64]等设计,与传统存储数据处理不同的是,体全息的信道编码为二维页面。一般都是综合运用信道处理技术,来达到全面提升体全息数据存储系统性能的目的。日立公司在 InPhase 的多角度相位共轭存储结构上,综合利用了编码技术和信息处理技术^[65],将存储密度提高了1.78倍,在1.5 mm厚的材料上,实验演示了高达 2.4 Tb/in^2 的存储密度。

4 体全息存储新动向

目前,体全息存储试验样机演示的最大存储密度大约为 2.4 Tb/in^2 (1 mm厚存储材料),该值比理论极限值 40 Tb/in^2 小一个数量级,如何在现有角度复用、移位复用等技术的基础上进一步增加存储控制的自由度是当前研究的一个热点,主要采用的思路是使用光波的相位特性和偏振特性。

4.1 相位全息存储

全息的最大特点就是同时记录和再现光的振幅和相位信息,而目前的全息光存储主要利用振幅信息,并未充分发挥全息的特点。相位调制,既可以增加调制信息的参数,又可以在再现过程中利用相位编码的正交性消除页内和页间串扰噪声,增加存储密度。利用相位调制还可以分散物镜焦点附近光能量,解决存储材料的动态范围问题。相位型存储的难点在于相位不可直接探测,需要利用干涉等方法将相位转换为强度信息^[66]。

2011年,香港城市大学和中国科学院上海光学精密机械研究所合作提出了纯相位型共光路存储方案^[67],通过特殊的编码和使用高通滤波器,有效实现了谱面的匀化,该编码方法巧妙实现了相位-振幅的转换,不用额外引入一束参考光来实现相位信息的转换。Holographics于2015年报道的研究结果采用了 90° 相差零差探测法以及 90° 相差复用方法来增加存储密度^[42]。

2013年,日本研究人员提出了“自参考全息”方法^[68],可以在不使用参考光的情况下实现全息的记录和读取。该方法的存储结构类似于同轴结构,但使用的是相位型 SLM,而且全部用于信息的存储,没有参考光部分,具有结构简单的特点。全息记录时,需要在待记录的相位信息上增加一个辅助相位,利用信号光各像素间的干涉实现记录,读取时,SLM只需上载记录时使用的辅助相位,即可实现相位到光强的转换,完成信息的再现读取。由于不存在参考光,限制了全息复用方式的使用。针对这个问题,该团队于2016年提出了三维移位复用方式,并进行了理论仿真计算,表明“自参考全息”理论上可使用三维移位复用提高存储密度^[69]。

2016年,日本研究团队提出了使用数字全息实现多灰阶的相位存储与振幅存储^[70],该方法的存储结构同样类似于同轴结构,不同的是采用了相位型 SLM,SLM上载的相位分布需要由数字全息技术根据待存储的数据计算得到。利用纯相位 SLM外加一个特殊设计的滤光片,可以实现记录数据的振幅与相位编码。

4.2 偏振全息存储

在具有光致各向异性材料中,全息曝光过程中的两相干光波干涉场的偏振空间调制可诱导材料中的分子取向与偏振调制对应,由此形成具有偏振调制特性的全息图,称为偏振全息记录^[71-72]。偏振全息记录与普通全息记录有两个明显区别。1)普通全息记录中,正交偏振光偏振不敏感在材料中不能激发产生全息图的记录,但在偏振全息记录中,由于材料具有光致各向异性,正交偏振光仍然可在材料中激发产生全息图的记录;2)当采用与记录光波偏振正交的读取光读取全息图时,以普通全息记录的全息图通常可以再现出信息页,但以偏振全息记录的全息图则不能重建出信息页。因此,通过正交偏振记录的方式,可以在光致各向异

性材料中存储两个不同的信息页,并采用相应的偏振态分别读出,实现偏振复用。将偏振全息复用方式和传统的复用方式结合起来,有可能增加全息存储的密度。

由于偏振全息记录的材料厚度一般在 $200\ \mu\text{m}$ 以下,存储容量受限。2013年,台湾交通大学研究团队使用 $2\ \text{mm}$ 厚的 PQ/PMMA 材料进行了偏振全息存储的研究,而且发现使用圆偏振光存储,材料会表现出更好的调制度及灵敏度^[73]。

2016年,日本研究人员报道了同轴偏振全息的记录方法,首次在同轴结构的基础上实现了偏振全息的记录^[74]。该方法使用两个偏振态正交的相位 SLM 以及数字全息技术,光场经过奈奎斯特滤波后,可以将 SLM 的相位分布转换为待存储的强度分布和相位分布,进行同轴全息的偏振存储与读取,其转换原理与文献^[70]中的相同。

5 体全息存储实用化问题分析

现有的存储技术在一定意义上是一种微小结构或单元的操控与探测技术,能够操控与探测的单元越小,存储密度越大,其极限受限于操控工具的大小。对于光存储,波长尺寸是其操控极限。虽然传统的二维面存储可以采用多层的方式向三维体存储迈进,但读取方式很难向二维的迈进。体全息存储的三维分布式存储不同于多层存储,其操作的单元为数据页而不是单个数据,给数据的快速读取提供了便利,但问题是存储密度能否接近理论极限,能否实现对现有技术的大幅超越。

限制体全息存储密度的核心问题是噪声。在相同软硬件条件下,存储的数据越多,噪声越大,信噪比就越低。信号的强度与衍射效率相关,取决于材料的动态范围和复用数,而且与复用数呈平方反比关系^[4]。噪声则主要包括页内串扰、页间串扰、光电系统噪声、材料散射噪声等。其中页间串扰主要与参考光特性以及复用方式有关,属于原理性噪声,是体全息存储过程的内在噪声。在理论研究方面,对每种存储结构,需要评估回答如下问题:如果光电器件和材料都是理想的,因页间串扰限制能够实现的存储密度极限是多少?这个值距离理论极限有多远?如何提高该值?目前国内外报道的文献对这方面研究较少。

对于材料研制方面,除了前面 3.2 节提到的材料收缩问题外,材料的散射噪声也是一个不可忽视的问题。在不考虑页间串扰、外部杂散光及光电系统噪声等干扰下,调制度的需求主要与材料的散射噪声相关,散射噪声越大,同等条件下需要的调制度越高。如果全息存储系统不存在散射噪声,则衍射效率可以降到很小,而合适的衍射光强可通过提高入射光光强的方式得到,从而保证光电探测的信噪比。因此,衍射效率的下限应该大于材料的散射能力,结合材料的动态范围可以得到材料的复用数,进一步可以评估材料的极限存储能力。基于页间串扰的极限与基于材料的极限共同决定最后的存储密度,两者需要匹配,单方面提高其中一种并不能提高最终的密度。

6 结束语

在数据时代的今天,大数据的存储呼唤新的存储技术,而体全息存储技术经过半个多世纪的发展,相关的工作依然十分活跃,技术创新持续不断,逐步走到了商用化的门口,极有可能成为下一代存储技术的主角。当然,由于体全息三维存储的独特特性,需要克服的技术难度依然很大,现有技术水平距其理论极限水平还有一定的距离。除用于数据存储之外,体全息存储技术还可以拓展到三维显示、增强现实以及光学信息处理领域,为世界经济的发展发挥越来越大的作用。

参 考 文 献

- [1] Reinsel D, Gantz J. The digital universe in 2020 [EB/OL]. 2012-12-01 [2017-04-01]. <https://www.emc.com/leadership/digital-universe/2012iview/index.htm>.
- [2] Haw M. Holographic data storage: the light fantastic[J]. Nature, 2003, 422: 556-558.
- [3] Heanue J F, Bashaw M C, Hesselink L. Volume holographic storage and retrieval of digital data[J]. Science, 1994, 265(5173): 749-752.
- [4] Coufal H J, Psaltis D, Sincerbos G T, *et al.* Holographic data storage, springer series in optical science[M]. Berlin:

- Springer-Verlag, 2000.
- [5] Curtis K, Dhar L, Hill A, *et al.* Holographic data storage: from theory to practical systems[M]. New York: Wiley Press, 2010.
- [6] Hesselink L, Orlov S S, Bashaw M C. Holographic data storage systems[J]. Proc IEEE, 2004, 92(8): 1231-1280.
- [7] Jin Guofan, Zhang Peikun. Trends in research on super-high density optical storage[J]. Journal of China Institute of Metrology, 2001, 13(2): 6-15.
金国藩, 张培琨. 超高密度光存储技术的现状和今后的发展[J]. 中国计量学院学报, 2001, 13(2): 6-15.
- [8] Tao Shiquan, Wang Dayong, Wang Zhuqing, *et al.* Holographic data storage[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2001.
陶世荃, 王大勇, 汪竹青, 等. 光全息存储[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.
- [9] van Heerden P J. Theory of optical information storage in solids[J]. Appl Opt, 1963, 2(4): 393-400.
- [10] Ashley J, Bernal M P, Burr G W, *et al.* Holographic data storage technology[J]. IBM Journal of Research and Development, 2000, 44(3): 341-368.
- [11] Horimai H, Tan X D, Li J. Collinear holography[J]. Appl Opt, 2005, 44(13): 2575-2579.
- [12] Tan Xiaodi, Hideyoshi Horimai. Collinear holographic information storage technologies and system[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 827-830.
谭小地, 堀秀嘉. 同轴式光全息存储技术及其系统[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 827-830.
- [13] Orlov S S, Phillips W, Bjornson E, *et al.* Ultra-high transfer rate high capacity holographic disk digital data storage system[C]. Proceedings 29th Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, 2000: 71-77.
- [14] Hwang E, Yoon P, Kim N, *et al.* Real-time video demonstration of holographic disk data storage system[C]. SPIE, 2006, 6282: 628205.
- [15] Hoskins A, Ihas B, Anderson K, *et al.* Monocular architecture[J]. Jpn J Appl Phys, 2008, 47(7): 5912-5914.
- [16] Mok F H. Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate[J]. Opt Lett, 1993, 18(11): 915-917.
- [17] Rakuljic G A, Leyva V, Yariv A. Optical data storage using orthogonal wavelength multiplexed volume holograms[J]. Opt Lett, 1992, 17(20): 1471-1473.
- [18] Denz C, Pauliat G, Roosen G, *et al.* Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method[J]. Opt Commun, 1991, 85(2/3): 171-176.
- [19] Curtis K, Pu A, Psaltis D. Method for holographic storage using peristrophic multiplexing[J]. Opt Lett, 1994, 19(13): 993-994.
- [20] Psaltis D, Pu A, Levene M, *et al.* Holographic storage using shift multiplexing[J]. Opt Lett, 1995, 20(7): 782-784.
- [21] He Q S, Wang J N, Wang J G, *et al.* Dynamic speckle multiplexing scheme in volume holographic data storage and its realization[J]. Opt Express, 2003, 11(4): 366-370.
- [22] Zheng T X, Cao L C, He Q S, *et al.* Image rotation measurement in scene matching based on holographic optical correlator[J]. Appl Opt, 2013, 52(12): 2841-2848.
- [23] Jose S. Flash drives replace disks at Amazon, Facebook, Dropbox[EB/OL]. 2012-06-13[2017-04-01]. <https://www.wired.com/2012/06/flash-data-centers/>.
- [24] Pan Yubiao. Study on performance optimization for SSD-based RAID arrays[D]. Heifei: University of Science and Technology of China, 2015.
潘玉彪. 固态硬盘容错阵列系统的性能优化研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [25] Anderson K, Ayres M, Sissom B. Holographic data storage: rebirthing a commercialization effort[C]. SPIE, 2014, 9006: 90060C.
- [26] Wilson W L, Dhar L, Curtis K. Progress toward the commercial realization of high performance holographic data storage: architecture and function of the inphase technologies holographic drive[C]. SPIE, 2006, 6335: 63350G.
- [27] Gruenwedel E. GE develops disc to store 100 DVDS, 20 BDS[J]. Home Media Magazine, 2009, 31(18): 17.
- [28] Wei Haoyun. Dual-channel volume holographic storage using cationic ring-opening polymerization photopolymer[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
尉昊贇. 阳离子开环聚合材料体全息双通道存储技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [29] Gu Huarong. Channel processing technologies in volume holographic data storage systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
顾华荣. 体全息数据存储系统中的信道处理技术[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [30] Li Jianhua. Reference pattern modulated collinear holographic stroage[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.

- 李建华. 参考光模式调制的共光轴体全息存储技术[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [31] Li J H, Cao L C, Gu H R, *et al.* Orthogonal-reference-pattern-modulated shift multiplexing for collinear holographic data storage[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(5): 936-938.
- [32] Wan Yuhong. Study on key problems of volume holographic disk storage technology[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005.
万玉红. 盘式体全息存储关键技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
- [33] Kimura K. Improvement of the optical signal-to-noise ratio in common-path holographic storage by use of a polarization-controlling media structure[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(8): 878-880.
- [34] Trautner H, Hossfeld W, Knittel J, *et al.* Test of key elements for common path holography[C]. SPIE, 2005, 5939: 593903.
- [35] Tanaka K, Hara M, Tokuyama K, *et al.* Improved performance in coaxial holographic data recording [J]. *Opt Express*, 2007, 15(24): 16196-16209.
- [36] Shimura T, Ichimura S, Ashizuka Y, *et al.* Shift selectivity of the collinear holographic storage system[C]. SPIE, 2007, 6282: 62820S.
- [37] Cao L C, Liu J C, Li J H, *et al.* Orthogonal reference pattern multiplexing for collinear holographic data storage[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(1): 1-8.
- [38] Shimura T, Tottori J, Fujimura R, *et al.* Signal-to-noise ratio calculation with statistical method in collinear holographic memory[C]. SPIE, 2010, 7797: 77970I.
- [39] Sun C C, Yu Y W, Hsieh S C, *et al.* Point spread function of a collinear holographic storage system[J]. *Opt Express*, 2007, 15(26): 18111-18118.
- [40] Anderson K, Curtis K. Polytopic multiplexing[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(12): 1402-1404.
- [41] Shimada K, Ishii T, Ide T, *et al.* High density recording using monocular architecture for 500 GB consumer system [C]. SPIE, 2009, 7505: 75050Q.
- [42] Ayres M R, Anderson K, Askham F. Holographic data storage at $2+ \text{Tbit/in}^2$ [C]. SPIE, 2015, 9386: 93860G.
- [43] Luo S J, Chen K X, Cao L C, *et al.* Photochromic diarylethene for rewritable holographic data storage [J]. *Opt Express*, 2005, 13(8): 3123-3128.
- [44] Erben C, Boden E, Longley K, *et al.* Ortho-nitrostilbenes in polycarbonate for holographic data storage[J]. *Adv Funct Mater*, 2007, 17(15): 2659-2666.
- [45] Cattaneo S, Lecomte S, Bosshard C, *et al.* Photoinduced reversible optical gratings in photochromic diarylethene-doped polymeric thin films[J]. *J Opt Soc Am B*, 2002, 19(9): 2032-2038.
- [46] Li Chengmingyue. Gold nanoparticles doped volume holographic photopolymers and their application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
李承明月. 金纳米球掺杂体全息聚合物及其应用[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [47] Hsu K Y, Lin S H. Holographic data storage using photopolymer[C]. SPIE, 2003, 5206: 142-148.
- [48] Suzuki N, Tomita Y. Highly transparent ZrO_2 nanoparticle-dispersed acrylate photopolymers for volume holographic recording[J]. *Opt Express*, 2006, 14(26): 12712-12719.
- [49] Li C M Y, Cao L C, He Q S, *et al.* Holographic kinetics for mixed volume gratings in gold nanoparticles doped photopolymer[J]. *Opt Express*, 2014, 22(5): 5017-5028.
- [50] Colburn W S, Haines K A. Volume hologram formation in photopolymer materials[J]. *Appl Opt*, 1971, 10(7): 1635-1641.
- [51] Zhao G, Mourouli S P. Diffusion model of hologram formation in dry photopolymer materials[J]. *J Mod Opt*, 1994, 41(10): 1929-1939.
- [52] Aubrecht I, Miler M, Koudela I. Recording of holographic diffraction gratings in photopolymers: theoretical modeling and real-time monitoring of grating growth[J]. *J Mod Opt*, 1998, 45(7): 1465-1477.
- [53] Sheridan J T, Downey M, O'Neil F T. Diffusion-based model of holographic grating formation in photopolymers: generalized non-local material responses[J]. *J Opt A: Pure & Appl Opt*, 2001, 3(6): 477-488.
- [54] Toishi M, Tanaka T, Watanabe K, *et al.* Analysis of photopolymer media of holographic data storage using non-local polymerization driven diffusion model[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2007, 46(6A): 3438-3447.
- [55] Burr G W, Ashley J, Marcus B, *et al.* Optimizing the holographic digital data storage channel[J]. *Advanced Optical Memories and Interfaces to Computer Storage*, 1998, 3468: 64-75.
- [56] Burr G W, Jefferson C M, Coufal H, *et al.* Volume holographic data storage at areal density of 250 gigapixels/in² [J].

- Opt Lett, 2001, 26(7): 444-446.
- [57] Bernal M P, Burr G W, Coufal H, *et al.* Balancing interpixel cross talk and detector noise to optimize areal density in holographic storage systems[J]. Appl Opt, 1998, 37(23): 5377-5385.
- [58] Yasuda S, Ogasawara Y, Minabe J, *et al.* Optical noise reduction by reconstructing positive and negative images from Fourier holograms in coaxial holographic storage systems[J]. Opt Lett, 2006, 31(11): 1639-1641.
- [59] Ayres M R. Method for holographic data retrieval by quadrature homodyne detection: US7623279[P]. 2009-11-24.
- [60] Nabavi S B, Vijaya Kumar B V K. Application of linear and nonlinear equalization methods for holographic data storage [J]. Jpn J Appl Phys, 2006, 45(2B): 1079-1083.
- [61] Kim H, Yoon P, Park J, *et al.* Misalignment compensation and equalization for holographic data storage[J]. Jpn J Appl Phys, 2009, 48(3): 03A034.
- [62] Chou W C, Neifeld M. Interleaving and error correction in volume holographic memory systems[J]. Appl Opt, 1999, 37(29): 6951-6968.
- [63] King B M, Neifeld M A. Sparse modulation coding for increased capacity in volume holographic storage[J]. Appl Opt, 2000, 39(35): 6681-6688.
- [64] Heanue J F, Bashaw M C, Hesselink L. Channel codes for digital holographic data storage[J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(11): 2432-2439.
- [65] Nakamura Y, Hoshizawa T. Two high-density recording methods with run-length limited turbo code for holographic data storage system[J]. Jpn J Appl Phys, 2016, 55(9): 09SA01.
- [66] Joseph J, Waldman D A. Homogenized Fourier transform holographic data storage using phase spatial light modulators and methods for recovery of data from the phase image[J]. Appl Opt, 2006, 45(25): 6374-6380.
- [67] Jia W, Chen Z Y, Wen F J, *et al.* Coaxial holographic encoding based on pure phase modulation[J]. Appl Opt, 2011, 50(34): H10-H15.
- [68] Takabayashi M, Okamoto A. Self-referential holography and its applications to data storage and phase-to-intensity conversion[J]. Opt Express, 2013, 21(3): 3669-3681.
- [69] Eto T, Takabayashi M, Okamoto A, *et al.* Numerical simulations on inter-page crosstalk characteristics in three-dimensional shift multiplexed self-referential holographic data storage[J]. Jpn J Appl Phys, 2016, 55(8S3): 08RD01.
- [70] Nobukawa T, Nomura T. Multilevel recording of complex amplitude data pages in a holographic data storage system using digital holography[J]. Opt Express, 2016, 24(18): 21001-21011.
- [71] Nikolova L, Ramanujam P S. Polarization holography[M]. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [72] Wang J, Kang G, Wu A, *et al.* Investigation of the extraordinary null reconstruction phenomenon in polarization volume hologram[J]. Opt Express, 2016, 24(2): 1641-1647.
- [73] Lin S H, Cho S L, Chou S F, *et al.* Volume polarization holographic recording in thick photopolymer for optical memory[J]. Opt Express, 2014, 22(12): 14944-14957.
- [74] Nobukawa T, Fukuda T, Barada D, *et al.* Coaxial polarization holographic data recording on a polarization-sensitive medium[J]. Opt Lett, 2016, 41(21): 4919-4922.