



DOI: 10.12086/oe.2019.180642

光全息数据存储——新发展时机已至

林 泉^{1,2}, 郝建颖¹, 郑明杰^{1,3}, 戴天贵^{1,3}, 李 晖^{1,2}, 任宇红^{1*}¹福建师范大学光电与信息工程学院, 福建 福州 350117;²福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350117;³医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350117

摘要: 本文对过去 50 年中光全息数据存储技术的发展进行了综述。随着关键器件和材料的不断发展, 光全息数据存储技术也日臻成熟。当下正值大数据时代, 对数据存储密度和数据存取速度的需求比以往任何时候都要大, 光全息数据存储以其超大存储容量、超快读取速度、超长保存寿命等优势, 成为下一代数据存储技术的有力候选者。其中同轴全息存储系统以其结构紧凑、操作简单、兼容性强等特点将成为全息存储技术进一步实用化的基石。同时新型的相位调制光全息数据存储系统正成为研究热点, 新一轮的飞速发展时机已至。

关键词: 光全息; 数据存储; 大数据; 相位调制**中图分类号:** O436.3; O438.1**文献标志码:** A**引用格式:** 林泉, 郝建颖, 郑明杰, 等. 光全息数据存储——新发展时机已至[J]. 光电工程, 2019, 46(3): 180642

Optical holographic data storage —The time for new development

Lin Xiao^{1,2}, Hao Jianying¹, Zheng Mingjie^{1,3}, Dai Tianguai^{1,3}, Li Hui^{1,2}, Ren Yuhong^{1*}¹College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350117, China;²Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, Fuzhou, Fujian 350117, China;³Fujian Provincial Engineering Technology Research Center of Photoelectric Sensing Application, Fuzhou, Fujian 350117, China

Abstract: The development of optical holographic data storage technology in the past 50 years is reviewed in this paper. With the continuous development of key devices and materials, optical holographic data storage technology is becoming more and more mature. At present, in the era of Big Data, the demands for data storage density and data transfer rate are greater than ever before. Optical holographic data storage has become a potential candidate for the next generation of data storage technology because of its advantages of superhigh storage capacity, superfast data transfer rate, and superlong storage life. The coaxial holographic storage system will become the cornerstone of further practicality of holographic storage technology because of its compact structure, simple operation and strong compatibility. Meanwhile, new phase modulated holographic data storage system is becoming the research hotspot. The new round of rapid development has arrived.

Keywords: optical holography; data storage; big data; phase modulation**Citation:** Lin X, Hao J Y, Zheng M J, *et al.* Optical holographic data storage—The time for new development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(3): 180642

收稿日期: 2018-12-05; 收到修改稿日期: 2019-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(61475019); 中央引导地方科技发展专项(2017L3009)

作者简介: 林泉(1989-), 男, 博士, 讲师, 主要从事光全息存储、偏光全息的研究。E-mail: xiaolin@fjnu.edu.cn

通信作者: 任宇红(1967-), 女, 助理实验师, 主要从事颜色工学的研究。E-mail: ninukou@126.com

1 应对爆炸式增长数据量的数据存储方案及其限制

随着信息科技的不断发展,信息早已被视为一种重要资源。对信息的保护、挖掘和数据存储等技术显得尤为重要。2012年被称为大数据元年,全球数据产生量呈爆炸式增长,大数据时代的来临使数据存储面临的压力骤增。国际数据公司(International Data Corporation, IDC)的研究结果显示,在2010年全球产生的数据总量为1.2 ZB(1 ZB=10³ EB=10⁶ PB=10⁹ TB),2013年数据量为4 ZB,2018年数据量为33 ZB。IDC公司最新预测,到2025年,全球数据总量将突破175 ZB。

如今的数据存储技术仍然以磁存储为主,典型的磁存储技术为硬盘存储和磁带存储。磁存储虽然发展成熟,但是其数据存储能力每年只提高20%左右,远远跟不上数据增长的速度。在存储方式上,磁存储仍脱离不了二维面存储的限制,如果想要进一步提高磁存储密度,就必然要不断减小记录磁性颗粒的尺寸。然而当磁性颗粒足够小时,就会受到超顺磁效应的影响,使得记录颗粒即使在常温状态下,也很难保持磁性的稳定。传统磁存储密度已经接近理论极限。在实际应用中,为了保证数据的冗余性,一般需要三个硬盘同时备份一份数据,而且每一个硬盘中的数据每4、5年就需要转移到新的硬盘中,否则信息将很可能会永久丢失。专业保存的磁带存储也需要每10年左右转移一次来避免数据的丢失。因此像Google等拥有大型数据中心的公司,其需要的服务器规模是相当庞大的,每年花费在数据转存方面的成本巨大,约占数据存储总成本的1/3。不仅如此,磁存储在数据的写入和读取过程中,驱动会散发大量的热,对服务器散热所耗电量的也是惊人的,电力花费也占总成本的1/3左右。因而磁存储技术的数据保存成本与数据增长量是同步的,都是呈爆炸式增长,磁存储技术面临的压力越来越大。

光存储也是一种重要的数据存储技术,目前最为常见的光存储技术就是光盘,如果用波长为 λ 的光作为数据存储的光源,则其理论存储面密度约为 $1/\lambda^2$ 。从最早的CD,到VCD、DVD再到现在的蓝光BD光盘,光盘存储的密度也在不断增大。然而目前的光盘存储仍是按位存储的二维面存储(尽管有的光盘可以实现多层存储,但层数有限),每一个记录位都只表示0或1的状态,其存储密度受记录位的尺寸的限制,

记录位的尺寸越小则数据存储密度越大。每一个记录位都是由激光光能汇聚刻蚀而成,想要得到更小的记录位尺寸就必须增大记录物镜的数值孔径以及尽可能用更短波长的激光器作为记录光源。目前最先进的蓝光光盘,数据记录物镜的数值孔径已经达到了0.85左右,激光器波长也已缩短至405 nm。现在一张单面单层记录的蓝光光盘可以拥有25 GB的存储容量,而双面四层的蓝光光盘即可达到200 GB的存储容量。因此著名数据公司Facebook于2014年开始就着手建造总容量可以存储1000 PB的蓝光光盘数据库,其数据存取能耗比磁存储的硬盘要低80%,且蓝光光盘的保存时间可达30年~50年,数据转存的成本被大大降低。Facebook的这套存储系统采用十分经济高效的冗余备份方式,可以以低于2的系数实现数据的备份冗余,保证了数据安全,而且不会因为随着规模扩大而导致性能下降。

尽管光盘存储的发展迅速,但目前仍是二维面按位存储,如果想进一步提高存储密度,就需要进一步提高记录物镜的数值孔径和进一步缩短记录光波长。但物镜的数值孔径在空气中理论值是小于等于1的,如果需要产生大于1的数值孔径,只能采用浸液的手段,其应用环境是受限的,实现成本会非常高,并且随着数值孔径的增大,光盘表面的保护层需要越来越薄,最终会失去保护作用。而记录光波长目前已经接近不可见光的范围,采用紫光或极紫外光激光器的成本也是非常高的。因此传统的光盘存储很难再次大幅提高存储密度,按照现在一张蓝光光盘200 GB的数据存储容量来计算,到2020年时,存储全球数据需要的光盘将超过5000亿张,其厚度加起来超过地球到月球的距离,叠起来存放可以绕地球13周。因此传统光盘存储也已经无法满足大数据存储增长的需要。新技术的发现和发 展迫在眉睫。

2 光全息数据存储技术——历久弥新的数据存储方案

光全息数据存储是利用全息原理进行数据存储和再现的光学存储技术。光全息存储最大的特点是突破了传统光盘存储的二维面存储模式,采用三维体存储模式,其理论存储密度为 $1/\lambda^3$ 。由于存储密度提升了一个维度,因此可以将现有的光存储密度提升几个数量级。

光全息数据存储技术主要利用全息拍摄原理,将

物的振幅和相位信息以全息图的形式记录在全息材料中。如图 1 所示,在记录过程中,光经过空间光调制器(一种二维光学元件,可以显示想要上载的二维图案),携带上二维图案的信息称之为物光。物光与另一束已知光场的光(参考光)在全息材料中进行干涉,形成复杂的光场分布,全息材料对不同强度的光场进行相应的响应,产生材料的变化并最终形成某种稳定结构,称之为全息图。这样就将物光信息记录在了全息材料中。在读取过程中,只需要利用同一束参考光以与记录时同状态的方式照射材料中的全息图,就会通过全息图的结构对参考光的耦合作用,将光能耦合到物光光场中,发生光的衍射。衍射出的光又称为重建光,重建光实际上与原始物光场的分布是一致的,因此就读出了物光信息。

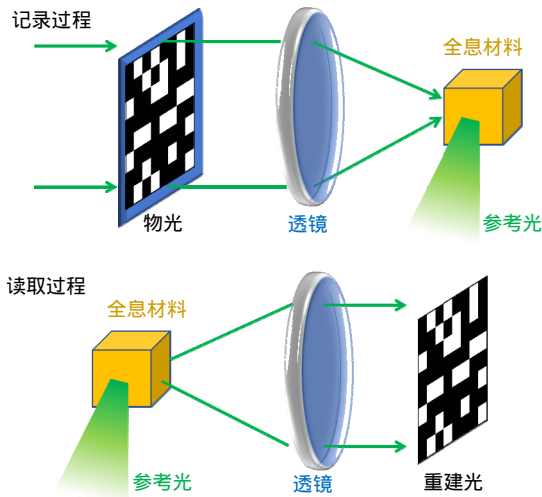


图 1 全息存储技术原理图

Fig. 1 Schematic diagram of holographic data storage technology

光全息存储可以摆脱按位存储的一维数据存储限制,每一个记录位置代表的都是一幅二维编码图案,

如图 2 所示。并且由于全息存储具有可复用记录的特点,因此记录位与记录位区域可以互相叠加,全息存储的记录密度可达 TB/in^2 ($1\text{ in}=2.54\text{ cm}$)量级。同时因读取的每个记录位置都是二维编码图案,数据读取转换速率也可达到 10 GB/s 量级。现在全息存储的材料性能也大幅提高,从早期的光折变晶体到现在的光致聚合物,材料的制备更容易,成本更低,保存数据寿命可达 50 年之久。因此,全息存储被认为是最有潜力的光存储技术,也是适应大数据时代的关键存储技术。

3 光全息存储的发展

3.1 理论发展最初阶段

早在 1948 年, Gabor 就提出了全息术的概念,当时只是涉及到了波前重建的方法,并没有将全息与数据存储联系起来,而是将全息技术用于 X 光成像的放大^[1-2]。最初的主要问题是良好的相干光源,因此同轴的波前重建系统都会出现共轭像,尽管 Gabor^[3]和其他一些科学家如 Kirkpatrick 和 ElSum^[4-5]、Baez^[6]和 Rogers^[7]等都在参与解决这一问题,但始终没有得到很好的结果。随着 20 世纪 60 年代初激光器的问世,一个良好的相干光源被找到,全息术开始进入高速发展阶段,这时已经可以实现清晰的图像记录和重建,而且由于光源相干性很好, Leith 等人提出参考光离轴的全息记录系统^[8-9],这样就避免了 Gabor 全息图中重建出的共轭像混叠在一处的情况。在 1963 年, Van Heerden 正式提出了全息数据存储这一概念^[10]。他将全息数据存储归于三维固态光信息存储,并估算出其存储密度极限为 V/λ^3 (V 是记录材料的体积, λ 是记录光波长)。随后, van Heerden 还讨论了在全息数据存储中利用参考光角度进行复用和利用波长进行复用的可能性。Leith 等人也在全息数据存储的发展早期,提

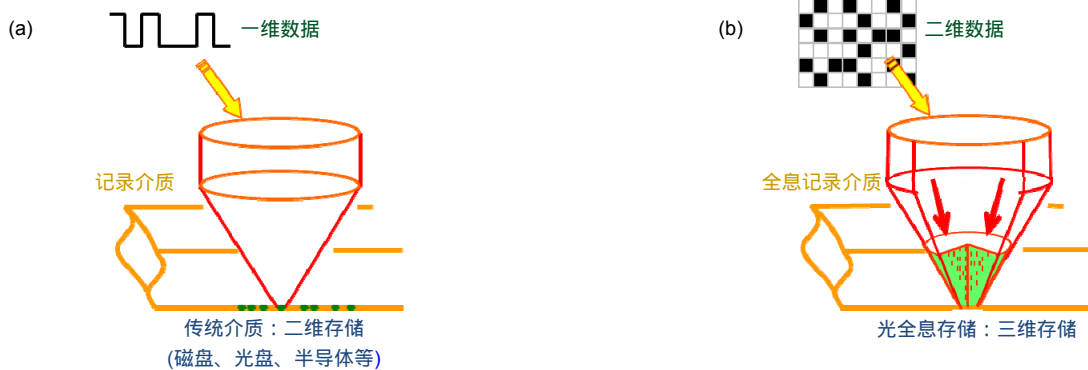


图 2 传统存储(a)与光全息存储(b)的比较

Fig. 2 The comparison between conventional storage (a) and optical holographic data storage (b)

出并验证了记录盘体旋转复用的技术^[11]。此时的全息技术已经颇具雏形,但是缺少有效的记录材料,关于全息数据存储大多停留在方法的讨论上。1966年,贝尔实验室的 Ashkin 等人在用铌酸锂晶体进行倍频实验时,意外地发现了光折变效应^[12]。从而,铌酸锂晶体作为一种光折变晶体被广泛研究并运用到全息数据存储中^[13-16],使得三维体全息数据存储再度成为了研究热点。由于材料的发展,一系列关于全息数据存储的验证实验被发表,更多的复用技术得到了研究。

3.2 各种验证系统纷至沓来

1973年,美国 RCA 公司的研究人员设计并验证了一款可以读写 10^6 bit 数据的全息存储器^[17]。1973年,日本 NEC 公司提出一个只读全息编码盘的全息数据存储系统,但是在二维进行存储,在 $128\text{ mm} \times 128\text{ mm}$ 表面,以 1 line/mm 的分辨率达到 2.5×10^5 bits 的存储容量^[18]。1973年, Huignard 等人首次证明了角度复用的规律,提出在一个位置记录 100 幅全息图可以达到 10^{11} bits 的总存储容量^[20],并在随后实验演示了角度复用方案,在掺铁铌酸锂晶体中角度复用了 10 幅全息图^[21]。1975年, RCA 公司的 Amodi 和 Sraebler 等人首次实现了在 1 cm^3 的掺铁铌酸锂晶体中记录 500 幅全息图^[22]。1976年, Mikaelian 描述了一个基于掺铁铌酸锂晶体的可重复写入的全息存储系统^[23]。1976年,日本日立公司报道了一个全息存储的视频光盘,在 300 mm 直径的光盘中存储了一段 30 min 的彩色视频,每个全息图的直径为 1 mm ,共在光盘上记录 54000 幅全息图^[24]。1980年, NEC 公司的 Kubota 等人描述了一种一维傅里叶变换全息图的全息光盘,用于记录音频信息,可以实现 256 Mbit/s 的数据转换速率^[25]。

尽管在 70 年代全息存储理论获得了飞速发展,但是仍然受限于当时的记录材料、调制器和探测器等参数落后的影响,早期的工作并不能获得令人满意的存储密度。

3.3 光全息存储飞速发展的十年

直到 90 年代初,随着记录材料、空间光调制器、CCD 探测器等关键材料和器件的发展,使全息数据存储系统的存储密度可以大幅提高,由此光全息数据存储进入了飞速发展的时期,在整机系统、材料研究和复用理论方面有了全面的提高。

3.3.1 系统发展

1991年, Mok 等人在 1 cm^3 的掺铁铌酸锂晶体中

存储了 500 幅军用车辆外形的全息图^[26]。而且仅过两年, Mok 等人就实现了在 1 cm^3 掺铁铌酸锂晶体中存储 5000 幅图像的实验,存储容量提升了 10 倍^[27]。1994年,斯坦福大学的 Hesselink 等人展示了一个图像和视频转换为多幅数据页的全数字全息存储系统,误码率可以达到 10^{-6} ^[28]。1994年,由 IBM 公司、斯坦福大学等七家公司和大学研究小组在美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)的部分赞助下,组成联合机构,主要研究光折变信息存储材料(optical refraction information storage material, PRISM),将材料用于全息存储当中,以期待在 5 年之内开发出具有 10^{13} bit 存储容量和 1 Gb/s 数据转换速率的全息数据存储系统。材料的测试系统由 IBM 公司提供,该系统不仅能存储和重建大数据页的全息图,而且能对重建结果进行误码率分析^[29]。世界上第一个完整的全息数据存储系统由斯坦福大学、Sirois、IBM^[30]和 Rockwell、Thousand Oaks^[31]等公司联合建立。同时加州理工大学和 Lucent 公司的研究人员也完成了类似的系统演示^[32]。

1997年, CIT 的 Pu 和 Psaltis 使用球面参考光通过移位复用在 1 mm 厚的掺铁铌酸锂晶体上获得面密度为 $100\text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 的体全息存储^[33]。1998年 Bell 实验室的 Curtis 等人利用相关复用技术在掺铁铌酸锂中的存储面密度超过了 $350\text{ bits}/\mu\text{m}^2$ ^[34]。

3.3.2 材料发展

在记录材料方面,除了早在 70 年代就开始研究的光折变材料外^[21,23,35],1994年,美国的 DuPont 公司开发出一种自由基聚合型光致聚合物(Photopolymer)^[36]。Curtis 等人对这种光致聚合物材料产品的全息存储特性进行了深入研究,应用环周复用和角度复用技术进行了全息存储实验。随后, Pu 等人将这种材料制成全息光盘,在每个平面单元区域内复用存储了 32 幅全息图,获得了 10^9 bit/cm^2 的存储面密度^[37]。光敏聚合物的敏感度比光折变晶体要高一到两个数量级,但材料的收缩问题也比较严重,因此要在材料动态响应范围和材料收缩之间寻找一个平衡点。Bieringer^[38]对此做了较为详细的解释。Polaroid 公司和贝尔实验室的研究人员在材料研究问题上采取了不同的方案, Polaroid 公司采用基于阳离子开环材料做了实验验证^[39-40],贝尔实验室和 Lucent 公司则基于自由辐射介质做了实验验证^[34]。后来,斯坦福大学和 Aprilis 公司(继 Polaroid 后继续开发)用阳离子开环材料实现了 DVD 大小盘体

上记录 250 GB 容量的信息,并且数据传输速率达到 10 Gb/s。2003 年,Waldman 等人用 400 μm 厚的 Aprilis 公司制造的光致聚合物材料 HMD-050-G-C-400 实现了大于 100 bits/ μm^2 的全息存储面密度^[41]。

在 2002 年,Suzuki 等人首次将 TiO_2 纳米颗粒掺杂入甲基丙烯酸酯光致聚合物薄膜中,研究发现全息曝光过程中材料的体积皱缩现象得到了抑制^[42]。这之后,纳米颗粒掺杂对材料进行改性的方法一直得到众多研究者的关注重点,在 2008 年,Goldenberg 等人研究了金属纳米颗粒的掺杂,将经过修饰的金纳米颗粒与羧基官能团丙烯酸酯单体混合,证明了纳米颗粒能够影响材料结构,抑制收缩,使材料更稳定^[43]。2010 年 Omura 和 Tomita 在 404 nm 激光下研究了 ZrO_2 纳米颗粒聚合物复合薄膜的性质,提出由于凝胶点的增加,材料的皱缩得到抑制^[44]。2011 年,Hata 等将硫代烯单体引入二氧化硅纳米颗粒聚合物复合材料中,考察了其光聚合动力学和体积全息记录特性,发现材料皱缩与热稳定性得到了极大改善^[45]。2014 年,李承明月等人的研究组提出了一种全息动力学模型来定量地表示体金纳米粒子(NPs)掺杂光聚合物中混合体光栅的动力学,描述了金纳米颗粒在聚合和多组分扩散过程中的行为,之后在制备的金纳米颗粒掺杂的 PQ/PMMA(polymethyl methacrylate)光致聚合物中实现了混合圆偏振-角度的体全息多路复用记录^[46-47]。2016 年,Tomita 等人引入具有超高折射率的超支化聚合物作为有机纳米颗粒,制备了纳米颗粒—聚合物复合体全息光栅,实现了折射率调制度的大幅提升,在 532 nm 波长下衍射效率接近 100%^[48]。在 2018 年,Liu 等人的研究组将银纳米柱分散在光致聚合混合物中制备了新型材料,并在超快纳秒激光器曝光下,展示了此纳米柱掺杂聚合物复合材料的光栅形成,这项工作通过掺杂银纳米粒子分析了互易失败的原因和聚合物全息特性的改善,优化的聚合物的衍射效率高达 51.4%^[49]。

除了在光致聚合物中掺入纳米颗粒外,还对光致聚合物体系进行了许多优化尝试。2012 年,Ortuño 等人针对于大部分光致聚合物组分具有毒性和它们的低环境相容性,开发了一种称为生物光电子的新的干光致聚合物,其具有低毒性和高厚度,非常适合全息数据存储应用^[50]。随后,在 2013 年,Ortuño 等人还提出一种新的链转移剂 4,4' 偶氮-双-(4-氰基戊酸)(ACPA),聚乙烯醇/丙烯酸酯光致聚合物(PVA/AA)

的性能能够通过引发剂 ACPA 得到改善^[51]。2016 年,Cody 等人研究了一种低毒、水溶性全息光聚合物的新型组合物,得到了记录衍射效率高达 50% 的明亮反射光栅^[52]。其后,范凤兰等人的研究组提出用化学方法修饰材料组份,制备了 PQ 负载双单体的光致聚合物材料,提升了光引发剂在光致聚合物中的溶解度,进而实现材料光学特性的提升^[53]。在 2018 年,Liu 等人提出了一种新型光敏剂掺杂的光致聚合物,并研究和描述了一种优化的三步热聚合的制备方法,详细研究了具有不同浓度的热引发剂和光引发剂的光致聚合物的特性^[54]。

通过纳米颗粒掺杂和优化聚合手段,目前的记录材料已经可以较好地适应光全息数据存储的需求,下一步需要在兼顾材料稳定性和高响应速率的情况下稳步提高衍射效率,进一步提高数据存储密度。

3.3.3 复用理论发展

体全息存储的最大优势在于可以运用各种复用技术来提高存储密度。在 20 世纪 90 年,代体全息存储的复用技术方面也得到了很好的发展^[28,55-56]。

角度复用是离轴全息数据存储系统运用较多的一种,利用了同一波长的平面波作为参考光,以不同角度入射在同一区域形成多幅全息图。以 1 cm 厚的铈酸锂晶体作为记录材料来说,500 nm 波长的激光作为记录和读取光,那么角度选择性大约是 50 μrad ,因此在参考光角度复用 30° 范围内可以记录 10000 幅全息图。

波长复用是利用不同波长的平面波作为参考光以同一角度入射形成多幅全息图的复用技术^[57]。波长复用通常比较适合于无机光折变晶体材料,而有机光致聚合物材料对不同波长的敏感程度不同,而且响应不是简单的线性关系。

相位编码复用是利用对复用全息图的参考光进行相位编码,使之最大限度地不互相发生串扰,尤其是参考光正交相位复用能有效地抑制页间串扰。而且相位调制的引入对提高信噪比也有增益^[58-59]。

位移复用是将不同全息图在空间上部分分开进行复用,即在某处记录一幅全息图后,移动一定距离再记录下一幅全息图。利用了 Bragg 失配后衍射效率急剧下降这一条件,使各个全息图读取时不互相影响。位移复用技术多用于有机光致聚合物材料,与光盘式全息数据存储系统可以很好的配合,是兼容性很高的一种复用方式。位移距离越小复用数越高^[60-62]。以上是主要的几种光全息存储地复用方式,还有的系统运

用了随机相位复用以及一些混合方式的复用等^[63-65]。

3.4 光全息数据存储产品化的尝试

光全息数据存储技术于 2000 年后尝试走出实验室,走向市场。2000 年,斯坦福大学研制出 HDSS (holographic data storage system) 盘式存储系统^[60]。其存储面密度为 70 bits/ μm^2 ,通过不断改进数据传输速率达到 10 Gb/s^[66]。美国 Aprilis 公司在此基础上深入研究材料,在 2002 年研制出存储容量达 200 GB 的光致聚合物光盘,于 2003 年推出了 Vulcan™DHD 驱动器样机,但传输速率仅为 75 Mb/s^[41]。2005 年日本 Optware 公司提出了同轴全息数据存储的方案^[67-70]。利用对记录材料敏感的绿光作为记录读取光,而对材料不敏感的红光作为寻址光^[71],改进了读写的光路使之更加简便,并引入伺服系统,使整个全息数据存储系统与人们接受的光驱 CD 系统更加兼容。该系统在 CD 尺寸相仿的聚合物光盘上存储了 100 GB 容量的数据。2006 年,从贝尔实验室脱离出来的美国 InPhase 公司推出了首个商品化全息数据存储系统 Tapestry™HDS-300R^[72-73]。与之相配的是三种不同容量和不同数据传输速率的光致聚合物光盘 HVD (holographic versatile disc)^[74-75],参数分别为:存储容量 300 GB、传输速率 20 MB/s;容量 800 GB、传输速率 80 MB/s;容量 1.6 TB、传输速率 120 MB/s。在存储方式上采用离轴的独创性的“Polytopic”方式^[76]。自此形成了以 Optware 公司为代表的同轴全息数据存储系统和以 InPhase 公司为代表的离轴全息数据存储系统并行的市场化探索格局。

3.5 国内对光全息存储的研究进展

国内对于光全息存储的研究也有一些基础,尤其在 90 年代光全息飞速发展的十年间,国内学者也紧跟步伐,成果斐然。陶世荃等人从记录材料铌酸锂晶体的研究入手,对光折变晶体的盘式全息存储做了很多工作,并提出了能较好地记录和重建信息的可行性方案^[77-80]。郭亚军等人对不同掺杂比例的铌酸锂晶体的记录特性进行了比较研究,优化了光折变晶体记录材料^[81]。刘友文和周常河等人对双掺杂和三掺杂的铌酸锂晶体进行研究^[82]。干福熹团队则对光致聚合物材料进行了大量研究^[83-86],该材料相对于光折变晶体更易制备、成本更低且光敏感度更高。金国藩等人对全息存储的系统问题进行了很多研究,如空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 与 CCD 之间的像素配准问题^[87]、系统小型化问题^[88]、SLM 和 CCD 器件性能

对页内噪声的影响问题^[89]、在离轴全息存储系统的参考光处加入位移散斑器实现动态散斑复用,可以抑制多纵模激光带来的串扰噪声^[90]等,主要侧重离轴全息系统的研究。李建华等人提出正交参考光位移复用法,减小了页间串扰^[91]。顾华荣等人对记录光阑的几何形状进行优化,获得了更低的误码率^[92]。魏浩云等人提出基于偏振全息图特性的双通道全息存储方案,数据传输速度提高了 2 倍^[93]。孙庆成等人则侧重同轴全息系统的研究,提出随机相位复用和透镜阵列调制的方案^[94-95],同时总结出同轴全息存储的点扩散函数^[96]。

但是国内在光全息存储方向的研究随着 InPhase 公司和 Optware 公司相继倒闭后遭遇了低潮,也说明当时的技术还不够成熟,尤其在材料方面仍无法令人满意。光折变晶体有着边记录边擦写的特点,不能长期记录与保存,而有机光致聚合物的皱缩问题和效率问题有待解决。另一方面在存储方式上仍是以振幅为主,没有发挥全息存储全部的优势。还有一方面很重要,那就是当时的数据存储需求并不很大,硬盘等成熟技术可以覆盖当时的存储需求。

2012 年后,大数据时代来临,数据存储的市场急剧增大。有机光致聚合物材料的制备经过近些年的发展也有了长足进步。谭小地团队提出相位型全息数据存储方式,并进行了大量相关研究^[97-100]。相位型全息数据存储因其具有更高的存储容量、更高的信噪比,正在成为研究热点。

4 两种典型光全息数据存储方案

光全息数据存储发展至今,大致形成了以 InPhase 公司为代表的离轴全息数据存储系统和 Optware 公司为代表的同轴全息数据存储系统并行发展的格局。实际上是根据参考光和物光光路是否共轴来进行分类。

4.1 离轴全息数据存储系统

离轴式系统通常采用角度复用的方式,通过控制参考光的入射角度,在记录材料的同一位置记录多幅物光信息,以此提高存储密度。典型的离轴全息存储系统可以参考 InPhase 公司的系统,如图 3 所示。

图 3 中 PBS (polarizing beam splitter mirror) 表示偏振分束镜,SLM 表示空间光调制器。经过 SLM 的一束光为信息光,另一束从分光镜分出的光为参考光,该两束光在光盘材料上某一区域进行干涉。参考光路中的振镜可以控制参考光的角速度,来实施角度复用。当读取时,利用参考光的共轭光(图中浅绿色光路)对全

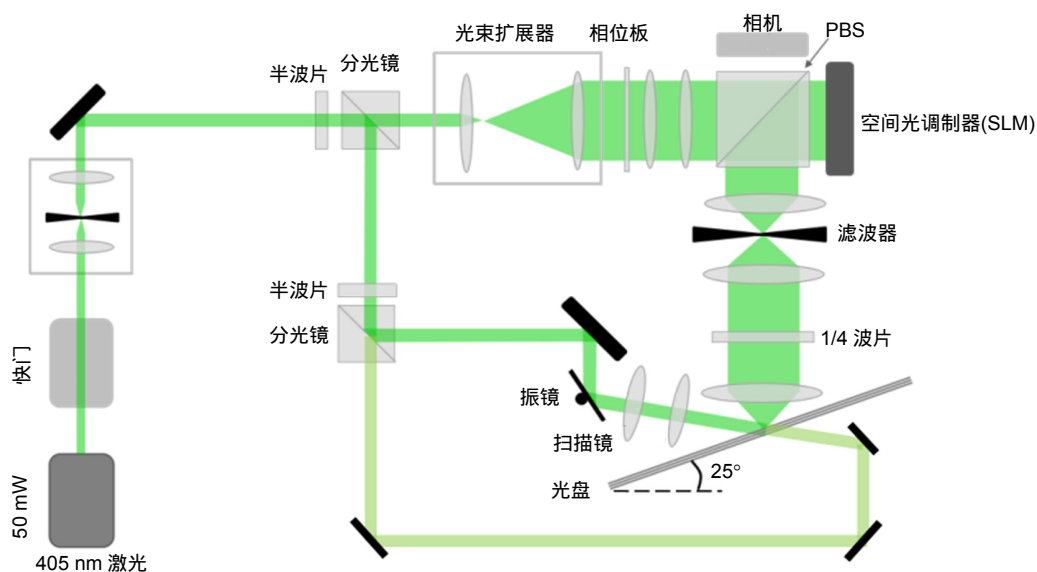


图 3 振幅式离轴全息存储系统示意图

Fig. 3 Illustration of amplitude-modulated off-axis holographic data storage system

息图进行读取，产生重建光，由于重建光再次经过四分之一波片，等效为信息光经过了一个半波片，因此 s 偏振光变为 p 偏振光，透过偏振分束器到达相机中。虽然在 SLM 前使用了相位板，但其目的是利用相位调制使得材料中的能量分布更均匀，获得高信噪比的全息图，相位在读取后的重建光中仍被忽略，因此本质仍然是振幅式系统。

离轴系统的特点在于参考光与信息光不在同一光轴上，且二者的夹角比较大，因此角度复用带来的失配量就会导致衍射效率急剧降低，其角度选择性非常敏感。但是光学系统较为复杂，不但在记录时要准确控制每一次的复用角度偏移，也要在读取过程中准确

地对记录位置进行寻址，这对于器件的控制精度要求很高。而且为了保证这样的控制精度，在每一次复用时，都需要通过机械控制停留一段时间，因此记录时间会相应增加。

4.2 同轴全息数据存储系统

同轴式系统的实用化方案由 Optware 公司提出的，利用同一个 SLM 来同时显示参考光和信息光，如图 4 所示。参考光在外圈，而信息光在中心，二者是空间分开的。然后用一个透镜将参考光和信息光同时汇聚到记录材料中，此时信息光的傅里叶变换和参考光的傅里叶变换形成了全息图被记录在材料中。在读

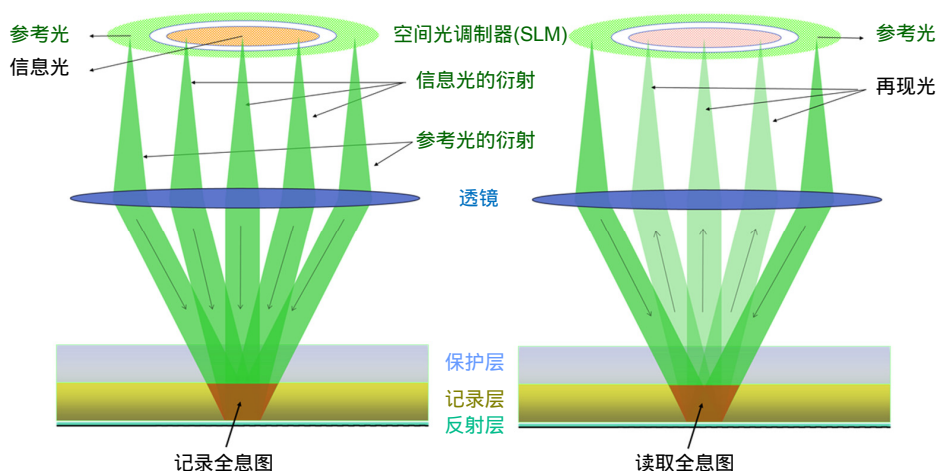


图 4 同轴全息存储方案记录和读取过程的示意图

Fig. 4 Illustration of writing process and reading process in collinear holographic data storage

取过程中,只需要在 SLM 上加载外圈参考光的图案,照射在全息图后,会在中心区域衍射出信息光,而参考光造成的零级衍射仍然会沿着外圈光路返回,这时只要用光阑将中心衍射的信息光过滤出来即可。

这套同轴全息存储方案很巧妙地避免了同轴全息容易出现的零级和 1 级混叠的问题。但实际上,在透镜后面,参考光与信息光仍然是需要有一定夹角,这个角度越大,1 级与零级越不容易混叠,且 1 级衍射重建光中的信噪比越高,因此往往透镜需要用一个大数值孔径的物镜,其数值孔径通常为 0.65 左右。

整体的同轴全息存储系统如图 5 所示。图中绿光为记录和读取光路,而红光为伺服系统光路。系统利用了记录材料对红光不敏感的特性,用红色激光作为伺服系统光源使用,其具体作用为定位全息图的记录位置并实时监测记录材料的动态,如果材料发生离焦、倾斜、平移等现象,则可根据光电探测器通过捕捉红光反射光来确定这些非理想的状态,并通过反馈控制物镜处的光学头的上下左右变换来进行补偿,保证了数据存储和数据读取的精确性。事实上,伺服技术已经广泛用于现在的光盘存储中。由于同轴式全息存储的复用方式是位移复用,与现在普通光盘的位移方式是一致的,因此其兼容性更强,能直接和伺服技术等成熟技术相结合。相比之下,离轴式的全息存储系统则无法方便地使用伺服系统。

4.3 离轴与同轴全息数据存储系统的比较

离轴全息存储系统与同轴全息存储系统的比较示

意图如图 6 所示。从系统光路的复杂程度上来看,同轴式系统更为简单且紧凑,离轴参考光路相对比较复杂。从复用方式上看,离轴式系统通常采用角度复用,该方式会造成记录材料的部分浪费,而且每次角度控制后都需要静止一段时间,因此属于静态读写。而同轴式系统通常采用位移复用,造成更少的记录材料浪费,而且记录过程中材料一直在运动,属于动态读写。由于同轴式系统能与伺服系统结合,使同轴式全息存储系统的兼容性和振动抗性也更强。因此作者认为同轴全息存储系统以其结构紧凑、操作简单、兼容性强等特点将成为全息存储技术进一步实用化和产品化的最佳方案。

5 相位型光全息数据存储系统

传统的光全息数据存储技术是针对于振幅进行调制的,因为探测器可以直接探测到振幅的分布。但传统的振幅调制系统有着两大缺点。首先,振幅编码的编码率相对较低,从目前采用的方法来看,振幅编码的编码率最大是 1,但是由于过多的像素使用将带来更大的误码率和材料消耗,因此一些经典的振幅编码,如 3:16 编码(即 16 个编码像素作为一个单元,一个单元内只有 3 个像素是亮的,其余像素是暗的)通过 3 个亮像素的不同位置组合可以在一个单元内存储 8 bit 信息,其编码率为 0.5^[101]。其次,记录材料往往是放在记录物镜的后焦面附近,以提高记录密度,但是振幅编码在经过物镜聚焦后,其中心强度在后焦面上过

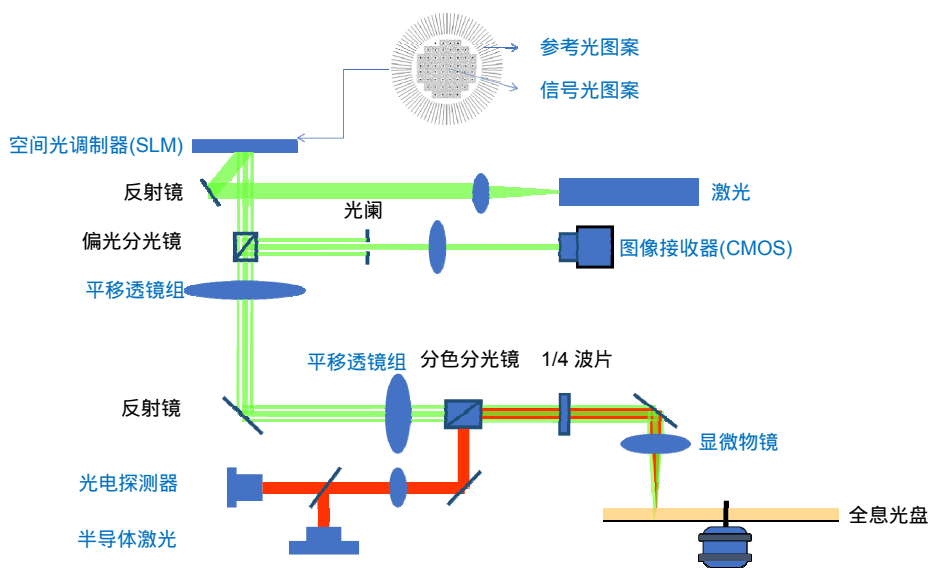


图 5 振幅式同轴全息存储系统示意图

Fig. 5 Illustration of amplitude-modulated collinear holographic data storage system

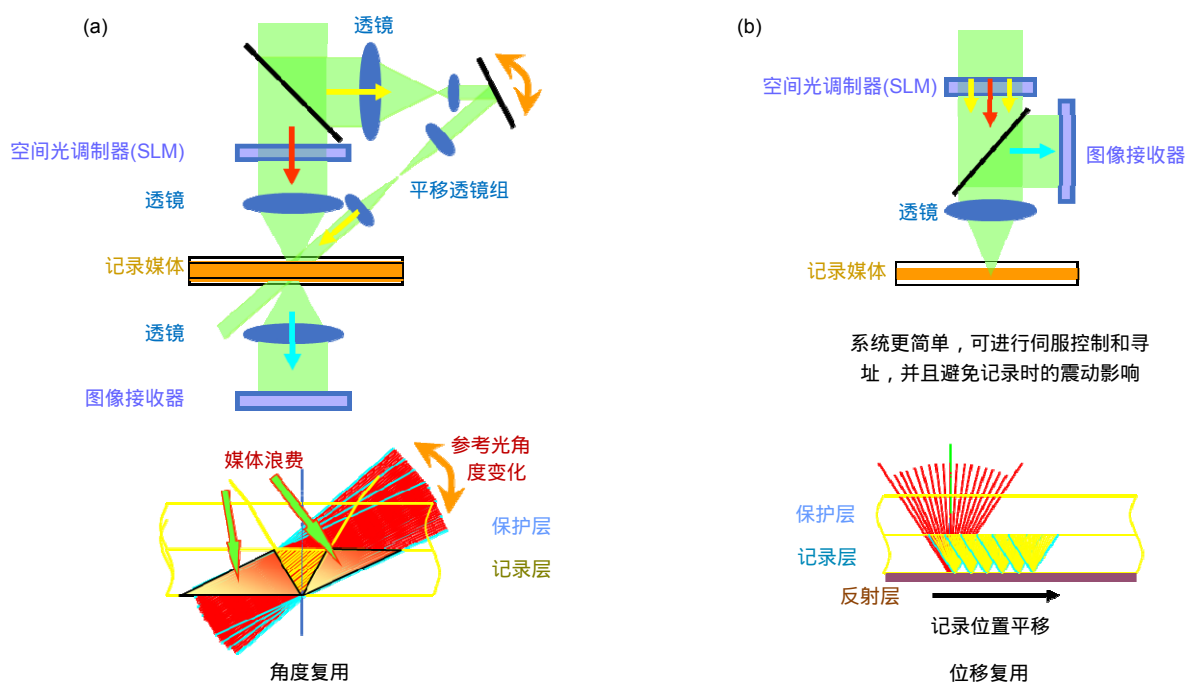


图 6 离轴全息存储(a)与同轴全息存储(b)系统的比较示意图

Fig. 6 The comparison between off-axis holographic data storage system (a) and collinear holographic data storage system (b)

于集中，会导致超出材料的动态响应范围而产生强度响应饱和现象，不仅使信噪比变低，而且消耗材料也更多，无法在同一位置附近复用更多的全息图。为了解决振幅调制出现的能量过于集中的问题，一种方法是将记录材料离焦的方法^[102-103]，但该方法会导致记录密度降低。另一种方法是将相位调制加入到振幅调制中，通常是在振幅调制后加入一个随机相位板，可以使材料中的能量从中心集中状态变为均匀分布状态，大大提高了信噪比，即提高了存储密度^[104-106]。但是这仍然无法解决振幅编码率低的问题，而且虽然在全息存储系统中用到了相位调制，但是相位信息具体是什么并没有去探测。这样也就忽略了相位一维信息，探测器探测的仍然只是振幅信息。

既然相位信息已经可以被记录，但是没有被读出，那么是否可以通过读出相位信息来提高记录密度呢？由此相位型光全息数据存储方案被提出，如图 7 所示。相位作为信息编码比振幅编码具有更大的优势。因为相位编码本身就是相位调制，不需要再加入随机相位板，这样系统更简单，也具有很高的信噪比。相位编码的编码率比振幅编码的编码率大幅提高，其编码率可以很容易突破 1 的限制。从实现方式上看，利用相

位进行编码也比以前更加容易。在硬件方面，自 2000 年以来，纯相位的空间光调制器件发展很快，液晶型的空间光调制器刷新速度不断加快，像素尺寸不断减小，而且相位调制深度不断加大。这就为相位编码提供了很好的支撑。与传统的振幅编码相比，一个 4 阶相位编码的编码率可以达到振幅编码的 4 倍，8 阶相位编码的编码率可以达到振幅编码的 6 倍。这都说明了，相位编码可以进一步提高全息存储的存储密度和数据转换速率。

然而，相位编码也存在着一些劣势。最大的问题就是目前相位无法被探测器直接探测到。对于相位型光全息数据存储系统，通常需要对读出光再次进行干涉，才能将相位信息转换成强度信息，用探测器捕获。再由相位与强度之间的余弦关系，推知相位信息。而干涉过程本身就是一个很敏感的过程，波长量级导致的相位差的改变都可能使强度发生变化。因此干涉系统的稳定性较差，系统容忍度较差。还有一点不足是，相位是以 2π 为周期周期性变化的，而相位与强度的关系又是余弦关系，因此在干涉光相位差不稳定时，经常会出现两个不同相位对应同一个强度值的现象，此时就无法正确读出相位。为了弥补这个缺点，通常人

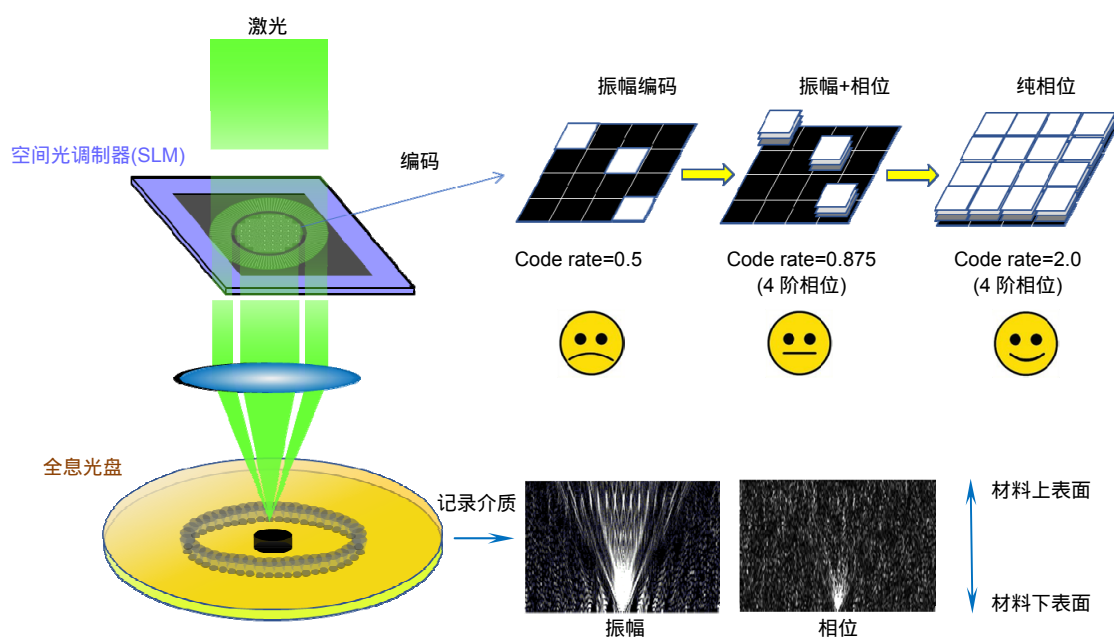


图7 相位型全息数据存储方案

Fig. 7 Phase-modulated holographic data storage method

们运用相移干涉法进行相位读取，即用几个不同相位的参考光与读出光进行干涉，这样就得到了多个方程，通过解方程组将正确的相位解出。在要求相位精度比较高的情况下，一般至少需要三次相移干涉才可以满足要求^[107-109]。这显然大大增大了数据读取的成本，降低了数据转换速率。

为弥补相位读取过程中的不足，Horimai 等人提出了同轴相位锁定方法，实现了仅一次干涉就可将相位解出^[110]。该方法是将另一束平面波也记录在材料中，然后也以重建光的形式出现，这一束光我们叫做相位读取光。在读取时，利用记录参考光将相位读取光和信息光同时再现出来，这时两束光就自发地进行干涉，干涉结果可以直接被 CCD 捕获。由于相位读取光和信息重建光都通过完全相同的光路，光程相等，因此在理想情况下，可以认为它们的相位差为 0，而且干涉结果更为稳定。虽然这种方法在实验中被验证可行，但是仍然有一些缺点。首先，相位读取光本身是不带有信息的，因此每读取一幅信息光，都需要额外消耗一幅全息图的材料，存储密度会降低一半。其次，将参考光分区分别与相位读取光和信息光对应，而且是在同一位置复用的形式进行记录，会导致重建信息光的衍射效率降低以及信噪比降低。

谭小地等人提出的利用相位编码对方法进行单次干涉相位读取^[111]。其实是将相移干涉所需的相位差编

码到一张数据页上，因此只需要一次干涉，却可以产生两种不同的结果，体现在一对像素的不同强度上。通过设置一些标准对，计算标准对与待测对之间的方差，来比较得到待测对的相位值。这种方法一定程度解决了相位读取复杂的问题。但仍无法避免干涉条纹抗干扰能力差、编码率降低一半等问题。

综上，既要发挥相位型光全息数据存储高编码率、高信噪比优势，又要兼顾相位读取的精度和速度，那么是否可以借鉴非干涉相位重建的方法将相位读出来呢？

非干涉相位重建算法有很多，例如基于 GS 算法的迭代傅里叶变换算法^[112-114]、PIE 算法^[115-116]、TIE 算法等^[117-119]。从系统简单和操作简单的角度来看，迭代傅里叶变换算法更加适合全息数据存储，因为它只需要得到读出光的傅里叶变换的强度分布，就可以利用算法恢复读出光的相位^[97,120]。最简单的系统是在读出光后加一个透镜即可，这样的非干涉系统既简单又稳定。传统该方法的重大问题在于需要计算的循环次数过多，这样会导致数据转换速率降低。但在全息存储中，可以通过在编码数据页中加入一些已知的嵌入数据来增强相位重建的约束条件，极大地缩短循环次数，快速完成相位重建。这样可以理解成数据流的一个总体延时，并不会影响数据转换速率。非干涉相位重建系统示意图如图 8 所示。

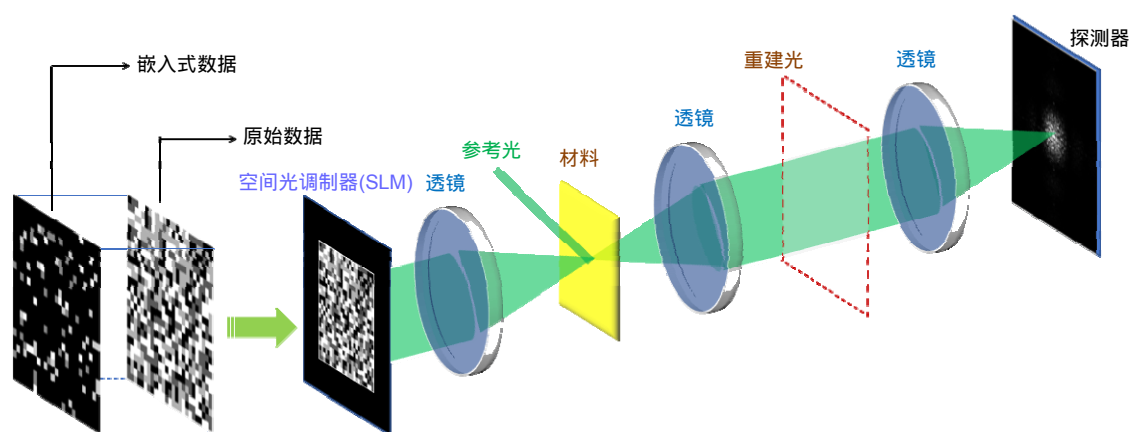


图8 非干涉迭代傅里叶变换法相位重建系统示意图

Fig. 8 Illustration of non-interferometric iterative Fourier transform algorithm phase retrieval system

6 对未来的展望

光全息数据存储技术发展了 50 多年,理论已较为完备,随着关键器件和材料的不断发展,实践也日渐成熟。现在正处于数据爆炸式增长的大数据时代,海量的数据存储需求以及 5G 高速数据通讯的需求都给光全息数据存储技术带来了新的发展契机,可以说该技术早已汲取足够养分,马上就要破土而出了。不久的将来,同轴光全息数据存储技术将会迎来更大的舞台,而相位型全息存储理论与同轴系统的结合也必将产生更为广阔的发展空间。

参考文献

- [1] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, **161**(4098): 777–779.
- [2] Gabor D. Microscopy by reconstructed wave-fronts[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1949, **197**(1051): 454–487.
- [3] Gabor D. Microscopy by reconstructed wave fronts: II[J]. *Proceedings of the Physical Society: Section B*, 1951, **64**(6): 449–469.
- [4] Kirkpatrick P, El-Sum H M A. Image formation by reconstructed wave fronts. I. Physical principles and methods of refinement[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1956, **46**(10): 825–830.
- [5] El-Sum H M A. Reconstructed wave-front microscopy[D]. Stanford: Stanford University, 1953.
- [6] Baez A V. Resolving power in diffraction microscopy with special reference to X-rays[J]. *Nature*, 1952, **169**(4310): 963–964.
- [7] Rogers G L. Gabor diffraction microscopy: the hologram as a generalized zone-plate[J]. *Nature*, 1950, **166**(4214): 237.
- [8] Leith E N, Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, **52**(10): 1123–1130.
- [9] Leith E N, Upatnieks J. Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1964, **54**(11): 1295–1301.
- [10] Van Heerden P J. Theory of optical information storage in solids[J]. *Applied Optics*, 1963, **2**(4): 393–400.
- [11] Leith E N, Kozma A, Upatnieks J, et al. Holographic data storage in three-dimensional media[J]. *Applied Optics*, 1966, **5**(8): 1303–1311.
- [12] Ashkin A, Boyd G D, Dziedzic J M, et al. Optically-induced refractive index inhomogeneities in LiNbO₃ and LiTaO₃[J]. *Applied Physics Letters*, 1966, **9**(1): 72–74.
- [13] Staebler D L, Amodei J J. Coupled-wave analysis of holographic storage in LiNbO₃[J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, **43**(3): 1042–1049.
- [14] Staebler D L, Burke W J, Phillips W, et al. Multiple storage and erasure of fixed holograms in Fe-doped LiNbO₃[J]. *Applied Physics Letters*, 1975, **26**(4): 182–184.
- [15] Ishida A, Mikami O, Miyazawa S, et al. Rh-doped LiNbO₃ as an improved new material for reversible holographic storage[J]. *Applied Physics Letters*, 1972, **21**(5): 192–193.
- [16] Shah P, Rabson T A, Tittel F K, et al. Volume holographic recording and storage in Fe-doped LiNbO₃ using optical pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 1974, **24**(3): 130–131.
- [17] Stewart W C, Mezrich R S, Cosentino L S, et al. An experimental read-write holographic memory[J]. *RCA Review*, 1973, **34**: 3–44.
- [18] Nishida N, Sakaguchi M, Saito F. Holographic coding plate: a new application of holographic memory[J]. *Applied Optics*, 1973, **12**(7): 1663–1674.
- [19] D'Auria L, Huignard J, Spitz E. Holographic read-write memory and capacity enhancement by 3-D storage[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1973, **9**(2): 83–94.
- [20] D'Auria L, Huignard J P, Slezak V C, et al. Experimental holographic read-write memory using 3-D storage[J]. *Applied Optics*, 1974, **13**(4): 808–818.
- [21] Amodei J J, Staebler D L. Holographic pattern fixing in electro-optic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 1971, **18**(12): 540–542.
- [22] Mikaeliane A L. Holographic bulk memories using lithium niobate crystals for data recording[M]//Barrekette E S, Stroke G W, Nesterikhin Y E, et al. *Optical Information Processing*.

- Boston, MA: Springer, 1978: 217–233.
- [23] Tsunoda Y, Tatsuno K, Kataoka K, *et al.* Holographic video disk: an alternative approach to optical video disks[J]. *Applied Optics*, 1976, **15**(6): 1398–1403.
- [24] Kubota K, Ono Y, Kondo M, *et al.* Holographic disk with high data transfer rate: its application to an audio response memory[J]. *Applied Optics*, 1980, **19**(6): 944–951.
- [25] Mok F H, Tackitt M C, Stoll H M. Storage of 500 high-resolution holograms in a LiNbO₃ crystal[J]. *Optics Letters*, 1991, **16**(8): 605–607.
- [26] Mok F H. Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(11): 915–917.
- [27] Heanue J F, Bashaw M C, Hesselink L. Volume holographic storage and retrieval of digital data[J]. *Science*, 1994, **265**(5173): 749–752.
- [28] Bernal M P, Coufal H, Grygier R K, *et al.* A precision tester for studies of holographic optical storage materials and recording physics[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(14): 2360–2374.
- [29] Shelby R M, Hoffnagle J A, Burr G W, *et al.* Pixel-matched holographic data storage with megabit pages[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(19): 1509–1511.
- [30] Hong J H, McMichael I C, Chang T Y, *et al.* Volume holographic memory systems: techniques and architectures[J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(8): 2193–2203.
- [31] Curtis K. Digital holographic data storage prototype[C]//*Proceedings of 2000 Optical Data Storage Conference Digest*, Whisler, BC, Canada, 2000: 164–166.
- [32] Pu A, Psaltis D. Holographic data storage with 100 bits/μm² density[C]//*Proceedings of 1997 Optical Data Storage Topical Meeting ODS Conference Digest*, Tucson, AZ, USA, 1997: 48–49.
- [33] Dhar L, Curtis K, Tackitt M, *et al.* Holographic storage of multiple high-capacity digital data pages in thick photopolymer systems[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(21): 1710–1722.
- [34] Thaxter J B, Kestigian M. Unique properties of SBN and their use in a layered optical memory[J]. *Applied Optics*, 1974, **13**(4): 913–924.
- [35] Zhou H J, Morozov V, Neff J. Characterization of dupont photopolymers in infrared light for free-space optical interconnects[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(32): 7457–7459.
- [36] Pu A, Psaltis D. High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(14): 2389–2398.
- [37] Bieringer T. Photoaddressable polymers[M]//Coufal H J, Psaltis D, Sincerbox G T. *Holographic Data Storage*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000: 209–228.
- [38] Orlov S S, Bjornson E, Phillips W, *et al.* High transfer rate (1 Gbit/sec) high-capacity holographic disk digital data storage system[C]//*Proceedings of 2000 Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Francisco, CA, USA, 2000: 190–191.
- [39] Waldman D A, Li H Y S, Horner M G. Volume shrinkage in slant fringe gratings of a cationic ring-opening holographic recording material[J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 1997, **41**(5): 497–514.
- [40] Waldman D A, Butler C J, Raguin D H. CROP holographic storage media for optical data storage greater than 100 bits/μm²[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **5216**, doi: 10.1117/12.513614.
- [41] Suzuki N, Tomita Y, Kojima T. Holographic recording in TiO₂ nanoparticle-dispersed methacrylate photopolymer films[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(22): 4121–4123.
- [42] Goldenberg L M, Sakhno O V, Smirnova T N, *et al.* Holographic composites with gold nanoparticles: nanoparticles promote polymer segregation[J]. *Chemistry of Materials*, 2008, **20**(14): 4619–4627.
- [43] Omura K, Tomita Y. Photopolymerization kinetics and volume holographic recording in ZrO₂ nanoparticle-polymer composites at 404 nm[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **107**(2): 023107.
- [44] Hata E, Mitsube K, Momose K, *et al.* Holographic nanoparticle-polymer composites based on step-growth thiol-ene photopolymerization[J]. *Optical Materials Express*, 2011, **1**(2): 207–222.
- [45] Li C M Y, Cao L C, He Q S, *et al.* Holographic kinetics for mixed volume gratings in gold nanoparticles doped photopolymer[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(5): 5017–5028.
- [46] Li C M Y, Cao L C, Wang Z, *et al.* Hybrid polarization-angle multiplexing for volume holography in gold nanoparticle-doped photopolymer[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(24): 6891–6894.
- [47] Tomita Y, Urano H, Fukamizu T A, *et al.* Nanoparticle-polymer composite volume holographic gratings dispersed with ultrahigh-refractive-index hyperbranched polymer as organic nanoparticles[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(6): 1281–1284.
- [48] Liu P, Zhao Y, Li Z R, *et al.* Improvement of ultrafast holographic performance in silver nanoprisms dispersed photopolymer[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(6): 6993–7004.
- [49] Ortuño M, Gallego S, Márquez A, *et al.* Biophotopol: a sustainable photopolymer for holographic data storage applications[J]. *Materials*, 2012, **5**(5): 772–783.
- [50] Ortuño M, Fernández E, Fuentes R, *et al.* Improving the performance of PVA/AA photopolymers for holographic recording[J]. *Optical Materials*, 2013, **35**(3): 668–673.
- [51] Cody D, Gribbin S, Mihaylova E, *et al.* Low-toxicity photopolymer for reflection holography[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, **8**(28): 18481–18487.
- [52] Fan F L, Liu Y, Hong Y F, *et al.* Improving the polarization-holography performance of PQ/PMMA photopolymer by doping with THMFA[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(14): 17794–17803.
- [53] Liu P, Wang L L, Zhao Y, *et al.* Holographic memory performances of titanocene dispersed poly (methyl methacrylate) photopolymer with different preparation conditions[J]. *Optical Materials Express*, 2018, **8**(6): 1441–1453.
- [54] Mok F H, Psaltis D, Burr G W. Spatially and angle-multiplexed holographic random access memory[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, **1773**: 334–345.
- [55] Orlov S S, Phillips W, Bjornson E, *et al.* High data rate (10 Gbit/sec) demonstration in holographic disk digital data storage system[C]//*Proceedings of the Summaries of Papers Presented at the Lasers and Electro-Optics. CLEO '02. Technical Digest*, Long Beach, CA, USA, 2002: 70–71.
- [56] Rakuljic G A, Leyva V, Yariv A. Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms[J]. *Optics Letters*, 1992, **17**(20): 1471–1473.
- [57] Denz C, Pauliat G, Roosen G, *et al.* Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method[J]. *Optics Communications*, 1991, **85**(2–3): 171–176.
- [58] John R, Joseph J, Singh K. Holographic digital data storage using phase-modulated pixels[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(2): 183–194.
- [59] Psaltis D, Levene M, Pu A, *et al.* Holographic storage using shift multiplexing[J]. *Optics Letters*, 1995, **20**(7): 782–784.
- [60] Steckman G J, Pu A, Psaltis D. Storage density of

- shift-multiplexed holographic memory[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(20): 3387–3394.
- [61] Pu A, Psaltis D. Holographic 3-D disks using shift multiplexing[C]//*Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics*, Anaheim, CA, USA, 1996: 165.
- [62] Darsky A M, Markov V B. Angular sensitivity of holograms with a reference speckle wave[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, **1238**: 54–62.
- [63] Barbastathis G, Levene M, Psaltis D. Shift multiplexing with spherical reference waves[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(14): 2403–2417.
- [64] Markov V, Millerd J, Trolinger J, et al. Multilayer volume holographic optical memory[J]. *Optics Letters*, 1999, **24**(4): 265–267.
- [65] Orlov S S, Phillips W, Bjornson E, et al. High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(25): 4902–4914.
- [66] Horimai H, Tan X D. Collinear technology for a holographic versatile disk[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(5): 910–914.
- [67] Horimai H, Tan X D, Li J. Collinear holography[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(13): 2575–2579.
- [68] Horimai H, Tan X D. Advanced collinear holography[J]. *Optical Review*, 2005, **12**(2): 90–92.
- [69] Horimai H, Tan X D. Holographic information storage system: today and future[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, **43**(2): 943–947.
- [70] Shih H F. Integrated optical unit design for the collinear holographic storage system[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, **43**(2): 948–950.
- [71] Wilson W L, Curtis K R, Anderson K E, et al. Realization of high-performance holographic data storage: the InPhase technologies demonstration platform[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **5216**: 178–191.
- [72] Dhar L, Curtis K, Fäcke T. Holographic data storage: coming of age[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(7): 403–405.
- [73] Wilson W L. Toward the commercial realization of high performance holographic data storage[C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, San Francisco, CA, USA, 2004: 4.
- [74] Schnoes M, Ihas B, Dhar L, et al. Photopolymer use for holographic data storage[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **4988**: 68–76.
- [75] Anderson K, Curtis K. Polytopic multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(12): 1402–1404.
- [76] Tao S Q, Xu M. Spatioangularly-multiplexed three-dimensional holographic disks[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(8): 1015–1020.
陶世荃, 徐敏. 采用空间-角度复用的盘式三维全息存储[J]. *光学学报*, 1997, **17**(8): 1015–1020.
- [77] Yuan Q, Tao S Q, Song X H, et al. Disk-type 3-D holographic storage in a photorefractive crystal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, **26**(12): 1097–1102.
袁泉, 陶世荃, 宋雪华, 等. 光折变晶体中的盘式三维全息存储[J]. *中国激光*, 1999, **26**(12): 1097–1102.
- [78] Song X H, Tao S Q, Jiang Z Q, et al. Study on thermal fixing process of holograms in photorefractive crystals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **28**(1): 59–62.
宋雪华, 陶世荃, 江竹青, 等. 光折变晶体中全息图的热固定过程研究[J]. *中国激光*, 2001, **28**(1): 59–62.
- [79] Wan Y H, Yuan W, Liu G Q, et al. Study on the characteristics of scattering noise in photorefractive holographic storage[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(6): 529–532.
万玉红, 袁韡, 刘国庆, 等. 光折变晶体全息存储中散射噪声特性的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6): 529–532.
- [80] Guo Y J, Zhang J, Liu C X, et al. Holographic storage properties of Zn:Fe:LiNbO₃ crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 570–572.
郭亚军, 张建, 刘彩霞, 等. Zn:Fe:LiNbO₃ 晶体全息存储性能研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 570–572.
- [81] Liu Y W, Liu L R, Zhou C H, et al. Experimental study of non-volatile holographic storage of doubly- and triply-doped lithium niobate crystals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **28**(2): 165–168.
刘友文, 刘立人, 周常河, 等. 双掺杂和三掺杂铌酸锂晶体稳定全息存储的实验研究[J]. *中国激光*, 2001, **28**(2): 165–168.
- [82] Yao H W, Huang M J, Chen Z Y, et al. Optimization of acrylamide-based photopolymer and its holographic character investigation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(11): 972–974.
姚华文, 黄明举, 陈仲裕, 等. 光致聚合物材料中引发剂浓度的优化和全息存储性能研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(11): 972–974.
- [83] Huang M J, Yao H W, Chen Z Y, et al. The factor of introducing the bragg-mismatch during the photopolymer holographic exposure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7): 855–859.
黄明举, 姚华文, 陈仲裕, 等. 导致光聚合物全息存储布喇格偏移因素的研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(7): 855–859.
- [84] Huang M J, Yao H W, Chen Z Y, et al. Study on the character of novel green light sensitive high-density digital holographic photopolymer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(11): 2536–2541.
黄明举, 姚华文, 陈仲裕, 等. 新型绿光敏感光致聚合物高密度全息存储特性[J]. *物理学报*, 2002, **51**(11): 2536–2541.
- [85] Huang M J, Yao H W, Chen Z Y, et al. The effect of the thickness of photopolymer on high-density holographic recording parameters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 246–249.
黄明举, 姚华文, 陈仲裕, 等. 厚度对光聚合物高密度全息存储记录参量的影响[J]. *光子学报*, 2002, **31**(2): 246–249.
- [86] Bao P, He S R, He Q S, et al. Compensation method for misregistration in pixel-matched holographic data storage system[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(2): 297–298, 301.
鲍鹏, 何树荣, 何庆声, 等. 像素 1: 1 匹配的晶体全息存储系统中像素位置偏移的补偿算法[J]. *光学技术*, 2005, **31**(2): 297–298, 301.
- [87] Cao L C, He Q S, Wei H Y, et al. Miniaturized volume holographic optical data storage and correlation system with a storage density of 10 Gb/cm³[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(23): 2495–2500.
曹良才, 何庆声, 尉昊赞, 等. 10 Gb/cm³小型化体全息数据存储及相关识别系统[J]. *科学通报*, 2004, **49**(23): 2495–2500.
- [88] Huang X B, He Q S, Wang J G, et al. Effect of performance of SLM and CCD on intrapage noise in volume[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(6): 543–544.
黄雄斌, 何庆声, 王建岗, 等. 体全息存储中 SLM 和 CCD 的性能对页内噪声的影响[J]. *光学技术*, 2002, **28**(6): 543–544.
- [89] Jin G F, Cao L C, He Q S, et al. Random modulation in high-density holographic data storage and correlation recognition system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **5206**: 125–134.
- [90] Li J H, Cao L C, Gu H R, et al. Orthogonal-reference-pattern-modulated shift multiplexing for collinear holographic data storage[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(5): 936–938.

- [91] Gu H R, Yin S F, Tan Q F, *et al.* Optimization of the geometrical shape of the aperture in holographic data storage system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6827**: 682711.
- [92] Wei H Y, Luo S J, He Q S, *et al.* Novel holographic storage system with two data channels[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5908**: 59081F.
- [93] Yu Y W, Chen C Y, Sun C C. Increase of signal-to-noise ratio of a collinear holographic storage system with reference modulated by a ring lens array[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(8): 1130–1132.
- [94] Yu Y W, Yang C H, Yang T H, *et al.* Analysis of a lens-array modulated coaxial holographic data storage system with considering recording dynamics of material[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(19): 22947–22958.
- [95] Sun C C, Yu Y W, Hsieh S C, *et al.* Point spread function of a collinear holographic storage system[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(26): 18111–18118.
- [96] Lin X, Huang Y, Shimura T, *et al.* Fast non-interferometric iterative phase retrieval for holographic data storage[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(25): 30905–30915.
- [97] Lin X, Huang Y, Li Y, *et al.* Four-level phase pair encoding and decoding with single interferometric phase retrieval for holographic data storage[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, **16**(3): 032101.
- [98] Tan X D, Horimai H, Arai R, *et al.* Phase modulated collinear holographic data storage system[C]//*International Workshop on Holography and Related Technologies*, 2016.
- [99] Lin X, Huang Y, Cheng Y B, *et al.* Inter-page-crosstalk reduction in holographic data storage system through phase modulation in signal region[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, **55**(9S): 09SA07.
- [100] Lin X, Ke J, Wu A A, *et al.* An effective phase modulation in the collinear holographic storage[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9006**: 900607.
- [101] Das B, Joseph J, Singh K. Performance analysis of content-addressable search and bit-error rate characteristics of a defocused volume holographic data storage system[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(22): 5461–5470.
- [102] Das B, Joseph J, Singh K. Improved data search by zero-order (dc) peak filtering in a defocused volume holographic content-addressable memory[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(1): 55–63.
- [103] Sun C C, Tsou R H, Chang W C, *et al.* Random phase-coded multiplexing of hologram volumes using ground glass[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1996, **28**(10): 1551–1561.
- [104] Gao Q, Kostuk R. Improvement to holographic digital data-storage systems with random and pseudorandom phase masks[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(20): 4853–4861.
- [105] Sun C C, Su W C, Wang B, *et al.* Diffraction selectivity of holograms with random phase encoding[J]. *Optics Communications*, 2000, **175**(1–3): 67–74.
- [106] Xu X F, Cai L Z, Wang Y R, *et al.* Blind phase shift extraction and wavefront retrieval by two-frame phase-shifting interferometry with an unknown phase shift[J]. *Optics Communications*, 2007, **273**(1): 54–59.
- [107] Jeon S H, Gil S K. 2-step phase-shifting digital holographic optical encryption and error analysis[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, **15**(3): 244–251.
- [108] Hariharan P, Oreb B F, Eiju T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm[J]. *Applied Optics*, 1987, **26**(13): 2504–2506.
- [109] Horimai H. Multi-level data write/retrieve by phase-locked collinear holography[C]//*Asia Communications and Photonics Conference*, Wuhan, 2016: AF1J.2.
- [110] Xu K, Huang Y, Lin X, *et al.* Unequally spaced four levels phase encoding in holographic data storage[J]. *Optical Review*, 2016, **23**(6): 1004–1009.
- [111] Fienup J R. Reconstruction of a complex-valued object from the modulus of its Fourier transform using a support constraint[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, **4**(1): 118–123.
- [112] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(15): 2758–2769.
- [113] Fienup J R, Wackerman C C. Phase-retrieval stagnation problems and solutions[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, **3**(11): 1897–1907.
- [114] Maiden A M, Rodenburg J M. An improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging[J]. *Ultramicroscopy*, 2009, **109**(10): 1256–1262.
- [115] Pan X C, Liu C, Lin Q, *et al.* Ptychographic iterative engine with self-positioned scanning illumination[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(5): 6162–6168.
- [116] Gureyev T E, Roberts A, Nugent K A. Phase retrieval with the transport-of-intensity equation: matrix solution with use of Zernike polynomials[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, **12**(9): 1932–1942.
- [117] Gureyev T E, Nugent K A. Rapid quantitative phase imaging using the transport of intensity equation[J]. *Optics Communications*, 1997, **133**(1–6): 339–346.
- [118] Volkov V V, Zhu Y, De Graef M. A new symmetrized solution for phase retrieval using the transport of intensity equation[J]. *Micron*, 2002, **33**(5): 411–416.
- [119] Lin X, Fujimura R, Umegaki S, *et al.* Single-shot phase reconstruction by iterative Fourier transform algorithm in the holographic data storage system[C]//*International Symposium on Optical Memory 2016*, Kyoto, Japan, 2016.

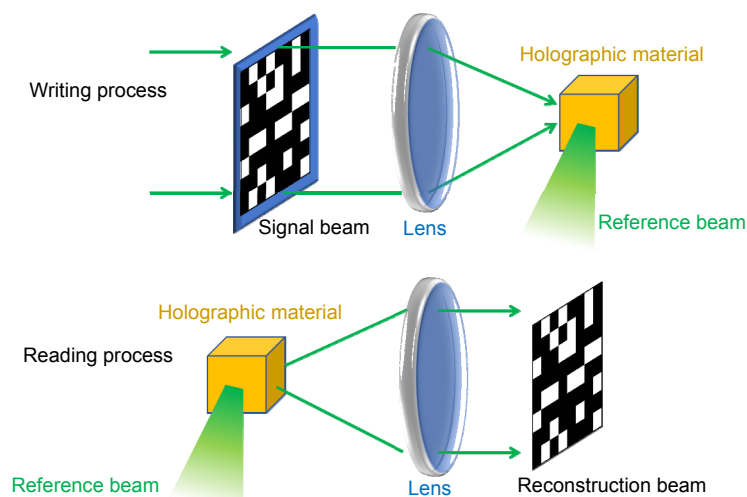
Optical holographic data storage —The time for new development

Lin Xiao^{1,2}, Hao Jianying¹, Zheng Mingjie^{1,3}, Dai Tianguai^{1,3}, Li Hui^{1,2}, Ren Yuhong^{1*}

¹College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350117, China;

²Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, Fuzhou, Fujian 350117, China;

³Fujian Provincial Engineering Technology Research Center of Photoelectric Sensing Application, Fuzhou, Fujian 350117, China



Schematic diagram of holographic data storage technology

Overview: The development of optical holographic data storage technology in the past 50 years is reviewed briefly according to time line in this paper. With the continuous development of key devices and materials, optical holographic data storage technology is becoming more and more mature. At present, in the era of Big Data, the demands for data storage density and data transfer rate are greater than ever before. Optical holographic data storage has become a potential candidate for the next generation of data storage technology because of its advantages of high storage capacity, fast data transfer rate, and long storage life. The theoretical researches of holographic data storage were done mainly in 1970s~1980s including some multiplexing technologies. The developments of key devices such as spatial light modulator and detector and recording material such as lithium niobate crystal and photopolymer pushed holographic data storage technology into practicability quickly in 1990s~2000s. In the aspect of system, there are two kinds of holographic data storage systems on-axis and off-axis. For instance, collinear holographic data storage system (CHDSS) by Optware corporation and 2-axis HDSS by InPhase corporation. 2-axis HDSS can provide sensitive Bragg selectivity to achieve high storage density by using angular multiplexing. CHDSS owns more compact structure, simpler operation and stronger compatibility by combining with servo system and by faster recording shifting multiplexing. In this paper, a comparison between two systems was given. We believe CHDSS may be the cornerstone of further practicality of holographic storage technology. In the aspect of code, conventional HDSS owns low code rate because it uses amplitude modulation which meanwhile gets low signal noise ratio (SNR) due to the overconsumption of dynamic range of recording material. To solve this problem, phase modulation is used in the HDSS to increase code rate and SNR. One challenge of phase modulation is that phase cannot be detected by the camera which can be solved by using interferometric and non-interferometric methods. Several phase retrieval methods are also mentioned in this paper.

Citation: Lin X, Hao J Y, Zheng M J, *et al.* Optical holographic data storage—The time for new development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(3): 180642

Supported by National Natural Science Foundation of China (61475019) and Special Funds of the Central Government Guiding Local Science and Technology Development (2017L3009)

* E-mail: ninukou@126.com