

光学学报

多维调制全息数据存储研究进展

谭小地¹, 林泉¹, 臧金亮², 范凤兰³, 刘金鹏⁴, 任宇红¹, 郝建颖^{1*}

¹福建师范大学光电与信息工程学院, 福建 福州 350117;

²中国计量科学研究院, 北京 100029;

³河北民族师范学院化学与化工学院, 河北 承德 067000;

⁴西安电子科技大学光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 大数据时代对数据存储提出了新的要求,为克服目前存储技术无法逾越的障碍,全息存储回到人们的视野,为了解决传统全息存储的记录密度与理论值相差较大的问题,本文作者团队提出了将光的振幅、相位和偏振均作为调制变量的多维调制全息数据存储技术;为验证多维调制的实验结果,针对具有偏振响应的全息存储材料特性提高方面也开展了研究。这些研究成果加速了全息存储技术应用的产业化步伐。本文以该团队在北京理工大学期间开展的多维调制全息数据存储技术的研究成果为基础,分别从光的振幅、相位和偏振调制机理出发,综述了各个调制方法的理论基础和应用实例,以及提高全息存储材料性能的有效手段,最后进行了总结和展望。

关键词 全息存储; 多维调制; 大数据保存; 存储密度

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS230741

1 引言

全息光存储方式是将信息存储在记录介质的立体空间里,以二维数据并行传送的方式进行读写,因此具有传统光盘无法比拟的大容量和高速度。早在 20 世纪 60 年代全息光存储方式就被誉为高密度、高速率的数据存储方式^[1]。但是由于当时没有很好的记录材料,全息光存储只是停留在概念研究上,并没有得到很好的发展。纵观全息光存储的发展历史,每一次大的进步都取决于材料的进步。20 世纪 90 年代,人们利用晶体的光折变效应进行体全息存储曾经一度成为研究热点,并提出过许多设计精巧的方案。美国 AT&T、Bell 实验室和 IBM、RCA、3M 等公司、英国 Thompson CSF 公司、日本 NEC、日立制作所等公司,以及美国加州理工学院和斯坦福大学的团队都尝试过全息光存储的研究^[2-6]。

进入 21 世纪后,以美国 InPhase^[7]和 Aprilis^[8]为代表的公司提出了光致聚合物(Photopolymer)作为全息光存储材料,其数据保存寿命可达到 50 年。日本 Optware 公司独特的同轴全息光存储方式可有效避免环境震动的干扰,将全息光存储技术向产品化推进了一大步^[9]。但是全息光存储技术的实际记录密度与理论值之间仍然存在很大的差距,究其原因,是传统全息

光存储技术中可用于调制的参量太少。利用光的各个参量进行多维调制,可进一步提高全息光存储的记录密度,充分发挥出全息光存储的原有能力。但是,如何记录和读取光的多维调制信息,是一个难题。

在国内,20 世纪 90 年代,北京工业大学研制了以晶体材料为记录介质的大容量盘式全息存储系统,实现了非易失性存储,体存储密度达到 10 Gb/cm³^[10]。清华大学分别在 2006 年和 2009 年构建了正交偏振双通道存取系统和大容量体全息相关系统^[11]。

自 2012 年开始,本文作者团队在北京理工大学开展了全息存储研究,并提出了增加相位^[12]和偏振^[13]调制方式,采用多维调制的全息光存储技术,这样不仅可以提高存储密度,还可以加快数据传送速率^[14]。同时针对偏振调制,还专门开展了基于张量模型的偏光全息理论研究^[15-18],其成果在世界同行中处于领先水平。在前人研究的基础上,该团队又研究了偏振敏感的复合型全息记录材料,通过引入新的感光剂^[19]以及复合基底甲基丙烯酸苄酯^[20],一定程度上提高了材料的偏振响应性能,为制备高性能多维响应材料提供了理论和技术基础。

目前,本文作者团队在利用多维调制提升全息数据存储性能的研究水平已经处于国际先进行列,这些成绩与该团队在北京理工大学光电学院期间开展的研

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-04-28; 录用日期: 2023-05-12; 网络首发日期: 2023-05-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0701800)、福建省科技重大专项(2020HZ01012)

通信作者: haojianying123@163.com

究工作是密不可分的。本文将介绍该团队在这段时间围绕这项技术开展的系列研究工作。谨以此文作为北京理工大学光电学院成立 70 周年之际的献礼。

2 全息存储技术发展简介

2.1 全息存储原理

全息存储是利用光全息拍照原理的数据存储技术,突破传统的二维面存储模式,采用三维体存储模

式,可将多维度的编码信息以全息图的形式记录在全息材料中。全息存储分为干涉记录和衍射读取两个过程,如图 1 所示^[21]。在记录时,光经过空间光调制器(SLM)上载二维图案信息,称为物光。物光与另一束参考光在全息材料中进行干涉,即全息图被记录下来。在读取时,只需要利用同一束参考光照射材料中的全息图,就会衍射出重建光,其光场信息与原始物光信息基本是一致的,即实现了信息的读取。

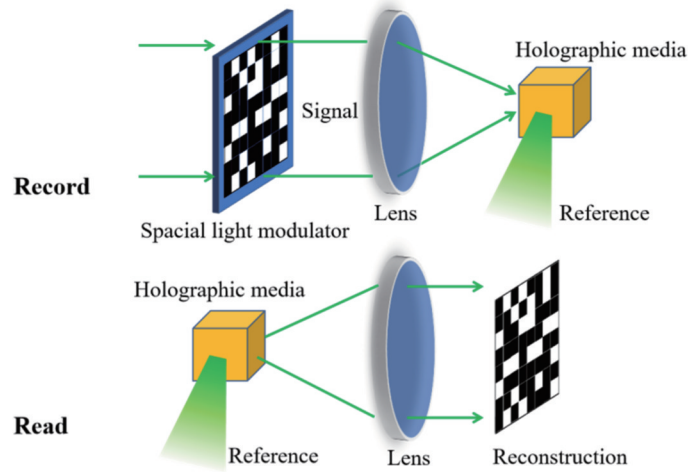


图 1 全息存储原理图^[21]

Fig. 1 Schematic diagram of holographic storage^[21]

与传统存储介质二维面存储和一维位读取方式相比,全息存储以三维体存储方式可以达到更高的存储密度,以二维数据页形式进行数据存取可以实现更快

的数据传输速度,如图 2 所示^[21]。加之光存储成本低、掉电保存时间久的特点,非常适合海量数据的长期保存。

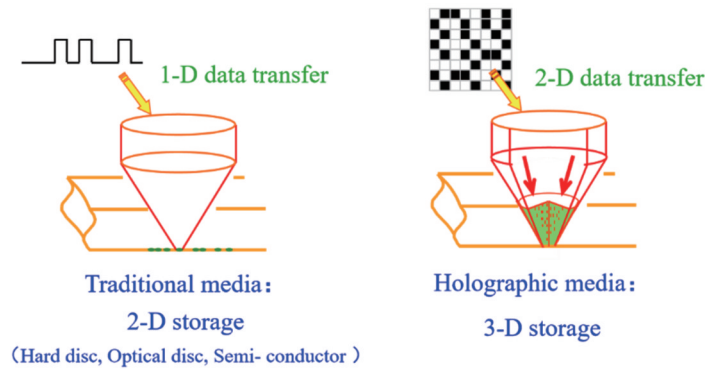


图 2 全息存储与传统存储方式的比较^[21]

Fig. 2 Comparison between holographic storage and traditional storage methods^[21]

2.2 全息存储国内外发展史

1948年,Gabor^[22]首次提出全息术的概念,将波前重建用于显微放大。20世纪60年代初激光器的问世,给全息术的应用提供了良好的相干光源,Leith等^[23-24]提出参考光离轴的全息记录系统,实现图像的记录和清晰重建。1963年,Van Heerden^[1]提出了全息数据存储这一概念,并估算出其理论存储密度为 V/λ^3 (V 是记录材料的体积, λ 是记录光波长)。1966年,Bell实验室的Ashkin等^[25]在用铌酸锂晶体进行倍频实验时,意

外发现了光折变效应,此后铌酸锂晶体作为一种光折变晶体被广泛地研究并运用到全息数据存储中^[26-29]。20世纪70到80年代,美国RCA公司^[30-31]、3M公司^[32]和日本NEC公司^[33-34]、日立公司^[35]等均相继开展了全息存储的验证性实验。

20世纪90年代,全息存储开始飞速发展。1991年,Mok等^[3]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。两年后,Mok等^[36]又实现了在 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。1994 年,斯坦福大学的 Hesselink 等^[2]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。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(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(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^[4]。世界上第一个完整的全息数据存储系统由斯坦福大学、Siros、IBM^[37]和 Rockwell、Thousand Oaks^[38]等公司联合建立。同期,加州理工学院和 Lucent 公司的研究人员也完成了类似的系统演示^[39]。除了全息存储系统上的快速发展外,在复用技术的理论研究方面也有所突破,角度复用^[40]、波长复用^[41]、位移复用^[42-44]、相位编码复用^[45-46],以及一些混合复用方法^[47-49]相继被提出并验证。

在全息记录材料方面,除了早在 20 世纪 70 年代就开始研究的光折变材料外^[50-52],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)^[53]。Pu 等^[54]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/cm² 的存储面密度。光敏聚合物的敏感度比光折变晶体要高 1~2 个数量级,但是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^[55]对此做了较为详细的解释。Polaroid 公司基于阳离子开环材料做了实验验证^[56-57]。斯坦福大学和 Aprilis 公司继 Polaroid 公司后继续开发,用阳离子开环材料实现了在 DVD 大小盘体上记录 250 GB 容量的信息,并且验证光学数据传输速率可达 10 Gb/s。2002 年,Suzuki 等^[58]首次将 TiO₂ 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。这之后,纳米颗粒掺杂对材料进行改性的方法被广泛关注和研究,优化了材料的性能^[59-61]。

在全息存储发展热潮影响下,20 世纪 90 年代,国内也开始了相关研究。陶世荃等^[62-65]、郭亚军等^[66]、周常河等^[67]从铌酸锂晶体材料的研究入手,对全息记录特性以及材料优化做了很多工作。干福熹团队^[68-71]则对另一种光致聚合物材料进行了大量研究,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^[72]对全息存储系统进行全面研究,解决了 SLM 与 CCD 的像素配准问题、系统小型化问题^[73]、噪声和串扰问题^[74-76]等。

2000 年后,全息存储尝试走出实验室,走向市场。美国 Aprilis 公司在 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 TMDHD 驱动器样机,数据传输速率为 75 Mb/s^[77]。2005 年,日

本 Optware 公司提出了同轴全息数据存储的方案^[78-80],通过结合伺服系统^[81],使全息存储系统更具兼容性。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 Bell 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 TMHDS-300R^[82-83]。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^[8,84],参数分别为:存储容量 300 GB、传输速率 20 MB/s;存储容量 800 GB、传输速率 80 MB/s;存储容量 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^[85]。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。但好景不长,几年内两家公司因资金短缺相继倒闭,全息存储研究热潮散去,虽然日本的日立、NHK、Sony 等公司仍持续了一段时间的研究,但投入力度也降低了。受此影响,国内关于全息存储的研究也基本停下来了。全息存储技术在当时产品化失败的原因有两方面:一方面,全息存储技术门槛高、开发投入大,且全息存储技术定位在家庭使用的光盘,加之受到网络数据存储的冲击所致;另一方面,在技术上全息存储的实际存储密度和材料寿命距理想值都差距较远,导致其数据保存成本高,无法令人满意。

2012 年大数据元年,海量的数据呈指数型增长,传统二维面存储的数据存储方式面临巨大压力,全息存储技术又回到了人们的视野。但是,要将全息存储技术实用化仍然面临着很多问题,在综合考虑全息存储和再现特性之后,本文作者团队提出了将光的所有属性,即:振幅、相位和偏振,均作为调制变量的多维调制方式,这样可以充分发挥全息存储自身的特性,从而使存储密度接近理论值,同时还要在材料方面有所突破,研发振幅、相位和偏振均可记录的成本低、性能好、寿命长的全息材料。

3 多维调制全息数据存储

3.1 振幅调制方法

3.1.1 同轴振幅系统

研究全息存储的多维调制方法,首先要恢复纯振幅调制的全息存储系统,并以此为基础进行相位和偏振调制的研究。研究沿用了同轴全息存储系统,如图 3 所示。绿色 532 nm 激光束照射到数字微反射镜(DMD)上携带上载的物光和参考光信息,其中物光为编码图案中心部分,参考光为外圈辐射线部分,该图案经过 4f 系统呈在物镜前焦面,经过物镜后在其后焦面相互叠加产生干涉图案,被材料所记录。读取时,只上载辐射线参考光即可衍射出物光部分,经光路返回被探测器接收,并进行解码得到数据。

为了使系统获得更强的抗噪能力,保证更低的误码率,需要对振幅进行有效编码。通常是将每一个像

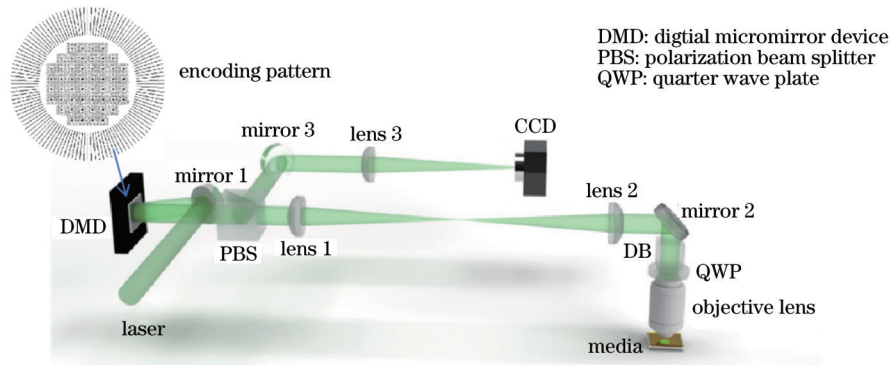


图 3 振幅调制式同轴全息存储系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of amplitude modulated collinear holographic storage system

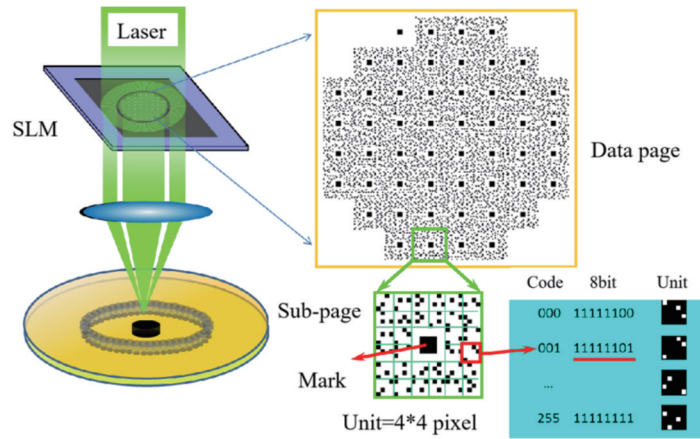


图 4 振幅编码^[86]

Fig. 4 Amplitude coding^[86]

素设定为两种状态:亮或者暗,这样可以获得最大的噪声容限。一种经典振幅编码方案是 3:16 编码方式,即 16 个像素中只有 3 个像素是亮的,如图 4 所示^[86]。SLM 中心部分的信息光是一个编码数据页,该数据页中包含 51 个子页,每个子页又由 32 个单元组成,每个单元是一个 4 pixel×4 pixel 大小的矩阵。每个子页中心的黑色方块是标准点,用于在数据读取中定位,使解码更加准确。每一个单元中都只有 3 个像素处于点亮状态,通过这 3 个亮像素位置的不同组合可以编码一个 8 bit 数据。振幅编码的劣势在于编码率较低,因此导致存储密度无法得到进一步提升。振幅编码要想提高编码率只能利用多灰度值调制,但是其累积起来的振幅噪声也是相当可观,必须对其进行降噪。

3.1.2 字典学习降噪

根据全息数据页调制位数可以将全息数据存储系统分为两大类:二值调制型^[87-88]和多值调制型^[89-90]。多值调制能显著提升数据存储密度和数据传输速率^[91,12],但与理论性能提升相悖的是多值调制型系统实际应用中更易受光学系统、光学材料以及光电器件等引入的噪声干扰。尽管 Tanaka 课题组^[92]与 Nobukawa 课题组^[93]从系统层面改进入手,通过偏振分离干扰、参考光束设计等方法提升了光学上的信噪比,但系统的总体噪声仍存在且不可忽略。当然,想完全

消除系统的噪声也是不现实的。因此,面对数据存储的低误码率需求,还需从编解码端入手提升噪声容限。

将具有一定矫正能力的纠错码应用到编码上是提升噪声容限的切实可行的一种解决方案,Goertzen 等^[94]、Kim 等^[95]和 Nakamura 等^[96]成功在编码端应用交叉奇偶校验码(CPC)、4/6 纠错调制码、run-length-limited (RLL)码等,降低了全息数据页误码率,如图 5 所示。

同时 Katano 等^[97]在解码端使用卷积神经网络实现对多值调制全息数据页的低误码率解码。除此之外,本文课题组还提出了一种基于压缩感知字典学习的解码方法^[98],通过改进的 K-SVD 稀疏字典训练和正交匹配追踪算法实现高噪声容限的数据页解码。压缩感知是 2004 年被提出的一种信息处理技术,利用信号的稀疏性可以实现低于 Nyquist-Shannon 采样率的信号重建。目前压缩感知技术在提高信息重建质量^[99]、降低测量要求^[100]和去噪^[101]方面展示了巨大的潜力。压缩感知理论成立需要满足稀疏性和不相关性要求,其中稀疏性的限制为去噪提供了可能。噪声在绝大多数域中呈现随机分布特性,即不符合稀疏性要求。因此,无法基于压缩感知重建原始噪声,如图 6 所示,重建噪声 $z' \ll z$ ^[98]。

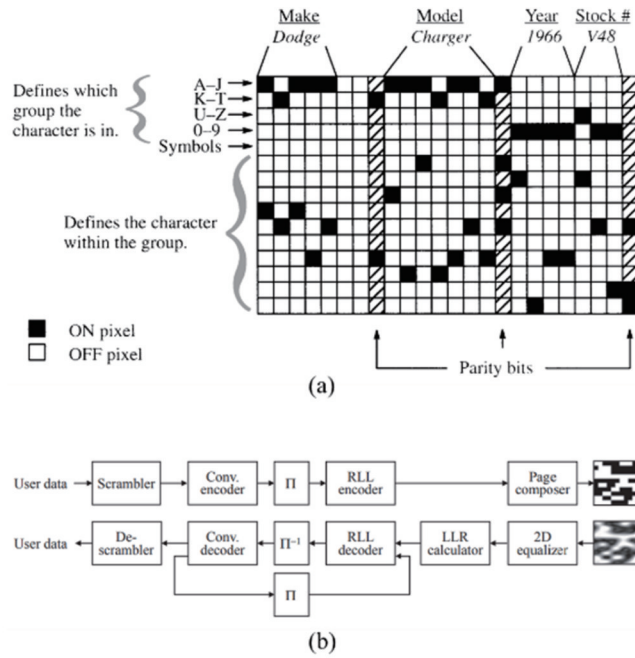


图 5 将具有一定矫正能力的纠错码应用到编码上。(a) CPC 码的数据库存储实例^[94]; (b) RLL 码的编解码过程^[96]
 Fig. 5 Apply error correction codes with certain correction capabilities to encoding. (a) Example of database storage of CPC codes^[94]; (b) encoding and decoding process of RLL codes^[96]

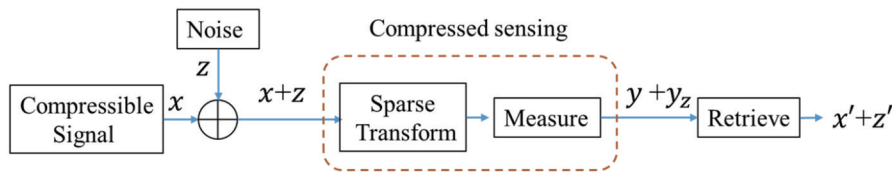


图 6 压缩感知去噪原理的示意图^[98]
 Fig. 6 Schematic diagram of principle of compression-aware denoising^[98]

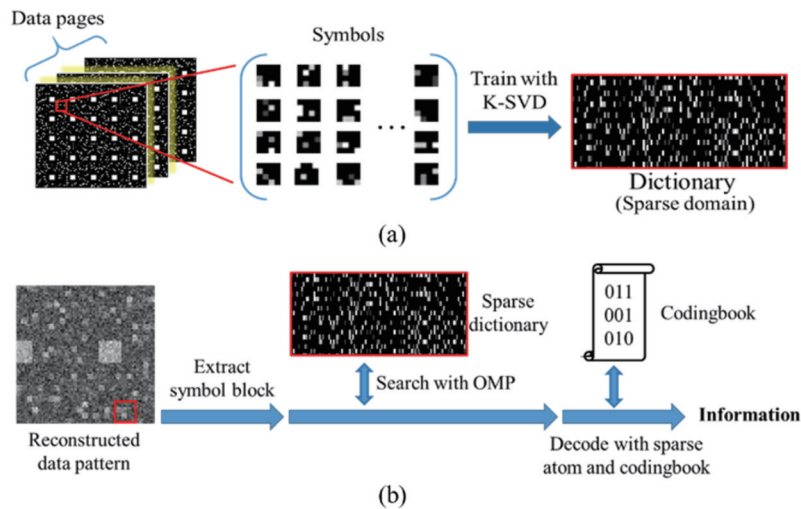


图 7 字典训练学习降噪方法^[98]。(a) 字典训练过程; (b) 含噪数据页解码过程
 Fig. 7 Dictionary training and learning noise reduction method^[98]. (a) Dictionary training process; (b) noisy data page decoding process

全息数据页可以被视为一种特殊图像,可以将压缩感知的去噪特性应用于数据页重构。并且与自然图像相比,人为设计的数据页规则性更强、细节更少。因此,能更容易地找到相应的稀疏域,事实上它与编码方

式是强相关的。本文作者团队提出了一种字典训练学习降噪的方法,如图 7 所示^[98]。对 5 值振幅调制型数据页进行了数值仿真和实验验证,在仿真中处理信噪比为一 1 的含噪数据页时,所提方法的解码误码率是传

统阈值判断方法的 1/6,同时实验验证也表现出了接近 8.3 倍的解码性能提升,但所提方法目前还仅针对纯振幅型调制,还未推广至相位型或复振幅型数据页的高性能解码。

3.2 相位调制方法

相位也是光的基本属性之一。相比于振幅调制,相位调制有两个优点,一是相位编码率更高,二是相位调制可以获得更高的信噪比,如图 8 所示^[21]。3:16 振幅编码率只有 0.5,而如果用 4 阶相位编码,则编码率可以到 2,是经典振幅编码的 4 倍,意味着存储密度可

提升 4 倍。相位编码阶数越高,存储密度越高。此外,相位调制可以使会聚在材料中的光强度均匀化,避免一些地方因光强超出材料的动态响应范围而产生噪声,所以相位调制也可以获得更高的信噪比。因此合理地进行相位编码既可以提高编码率也获得了相位调制能力,是一举两得。但是相位调制也存在缺点,即相位无法直接被探测器获取,这也是制约其应用的最主要因素。因此,如何进行高效的相位解码就成为了重要的研究课题。

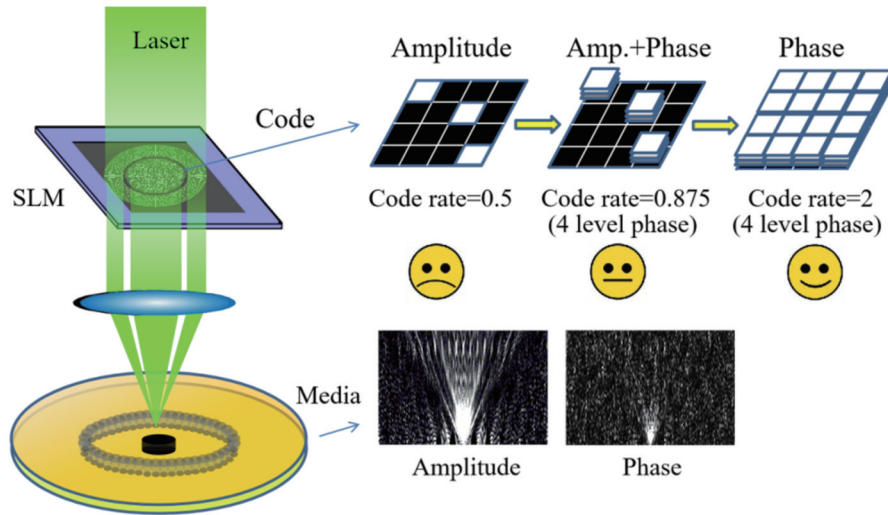


图 8 相位调制的优势^[21]

Fig. 8 Advantages of phase modulation^[21]

1) 干涉法

干涉法是最常用的一种读取相位的方法。对于全息存储系统来说,需要对重建光再次进行干涉,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。但干涉本身就是一个很敏感的过程,波长量级导致的相位差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,通常要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^[102-104]。这显然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^[105]提出了同轴相位锁定的方法,实现一次干涉将相位解出。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,这一束光叫作相位读取光。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,这时这两束光就自发地进行干涉,干涉结果可以直接被探测器捕获。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,将参考光分区域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。

本文作者团队提出一种编码对的相位编码方法,将需要多次相移干涉的相移量体现在编码对中,编码对的两个像素的相位存在一个固定的相位差,如图 9 所示^[106]。利用这种相位编码方法,在解码时只需要用一束平行光对重建光进行单次干涉即可。不仅相位读取光的相位可以是任意值,而且是在同一时间捕获单次干涉强度图,使数据转换速率加快并且排除了不同时间上探测造成的影响。

相位读取光与重建光进行干涉后,得到一个强度分布。将相位编码单元和得到的强度解码单元放在一起解释如何进行相位解码,如图 10 所示^[106]。与编码

单元中标准点区域对应的解码单元中产生 4 个标准强度 I_1, I_2, I_3, I_4 , 则根据这 4 个标准强度值可以生成 4 组标准强度对 $\{I_1, I_2\}, \{I_2, I_3\}, \{I_3, I_4\}, \{I_4, I_1\}$, 其分别对应编码单元中的标准相位对 $\{\phi_1, \phi_2\}, \{\phi_2, \phi_3\}, \{\phi_3, \phi_4\}, \{\phi_4, \phi_1\}$ 。此时待测的强度对用 $\{I'_n, I_n^*\}$ 表示, I'_n 代表上方像素, I_n^* 代表下方像素, 其中 $n=1, 2, 3, 4$ 。接下来需

要通过计算标准强度对与待测强度对的方差来找出待测强度对更偏向于哪一种标准强度对状态。由于有 4 组标准强度对, 因此每一组待测强度对需要分别与每一组标准强度对进行方差的计算, 找到最小方差值, 再将该方差值对应的标准强度对对应的标准相位对赋给待测相位对即可。

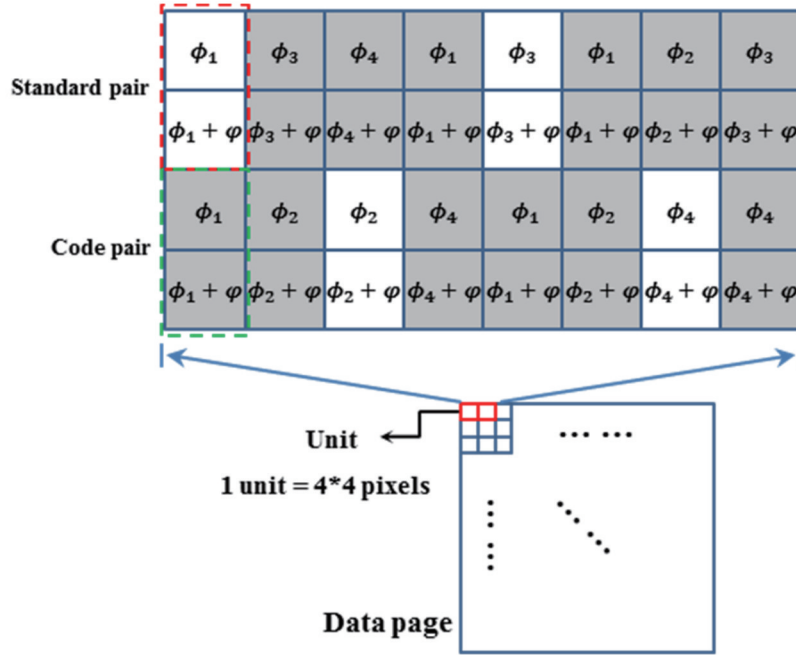


图 9 编码对形式的相位编码^[106]
Fig. 9 Phase coding of code pair^[106]

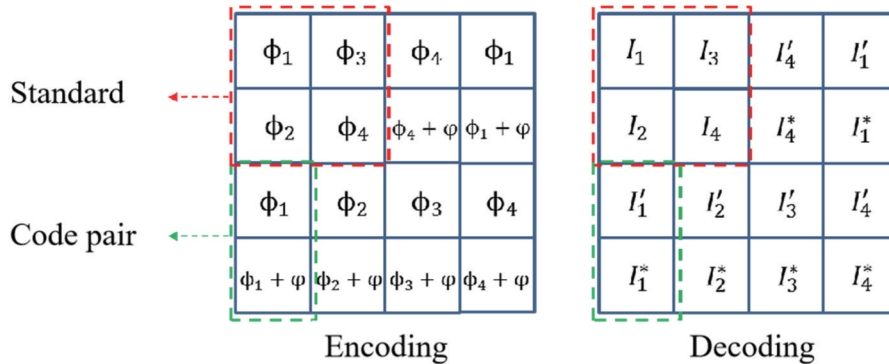


图 10 解码过程说明^[106]
Fig. 10 Description of decoding process^[106]

进行了单次干涉实验, 对比了不用编码对方法和使用编码对方法的相位解码结果, 如图 11 所示^[106]。实验结果表明, 使用编码对方法后, 误码率 (BER) 降低为原来的 1/7 左右。该方法一定程度地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。

2) 非干涉迭代计算法

干涉法相位读取不稳定, 不是全息存储合适的解决方案, 那么可以考虑非干涉的方法对重建光相位进

行解码。非干涉是由强度分布来恢复或者估算相位分布的方法, 在相位型全息存储系统中的最大优势就是稳定、抗干扰能力强。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^[107-109]、PIE 算法^[110-111]、TIE 算法等^[112-114]。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^[115]。

传统的迭代傅里叶变换算法有一个问题, 就是理

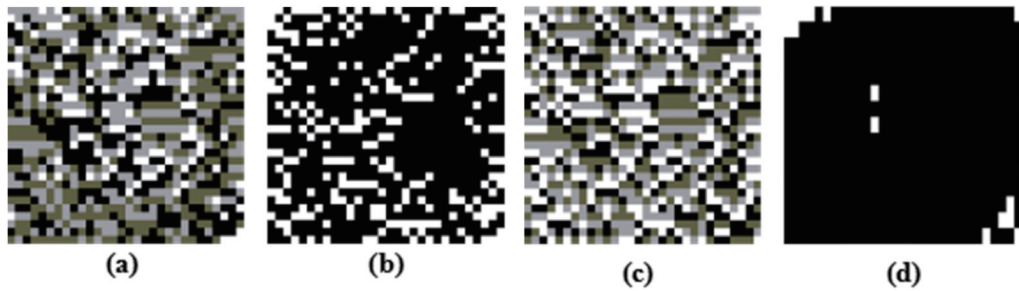


图 11 编码对方法解码实验结果^[106]。(a)非编码对解码;(b)非编码对解码 BER;(c)编码对解码;(d)编码对解码 BER

Fig. 11 Experimental results of decoding using code pair method^[106]. (a) Decoding without code pair; (b) decoding BER without code pair; (c) decoding with code pair; (d) decoding BER with code pair

论上相位重建的收敛过程在最初很快,又称为速降收敛,但是稍后收敛很快进入停滞,陷入局部收敛。因此往往收敛结果的傅里叶变换强度分布与理想分布总是存在 5% 左右的偏差。对一个复杂的相位分布进行重建时,只有极少数情况可以得到精确的结果。本文作者团队提出一种利用嵌入式数据的迭代傅里叶变换算法,在相位重建的迭代过程中提供强力的约束条件,以此来保证迭代的收敛路径跳出局部收敛直至最优解。

在全息存储系统中加入嵌入式数据操作起来非常容易,只需要将设计好的嵌入式数据编码在输入信息中,然后一起上载到纯相位的 SLM 上即可,如图 12 所示^[116]。CCD 拍摄重建光的傅里叶变换强度图作为频谱面约束条件,嵌入式数据作为物面约束条件,经过反复迭代计算,以傅里叶面的强度分布误差作为判断条件,最终收敛输出相位计算值,具体算法流程如图 13 所示。

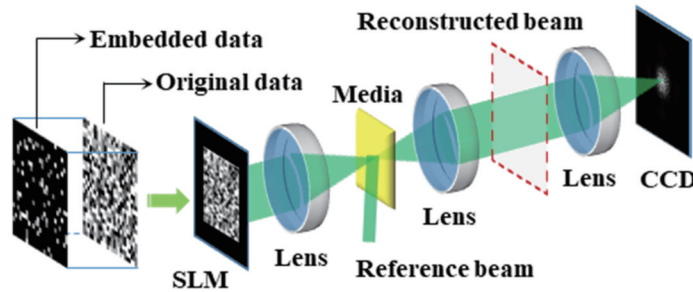


图 12 嵌入式数据的迭代傅里叶变换相位重建方案^[116]

Fig. 12 Iterative Fourier transform phase reconstruction based on embedded data^[116]

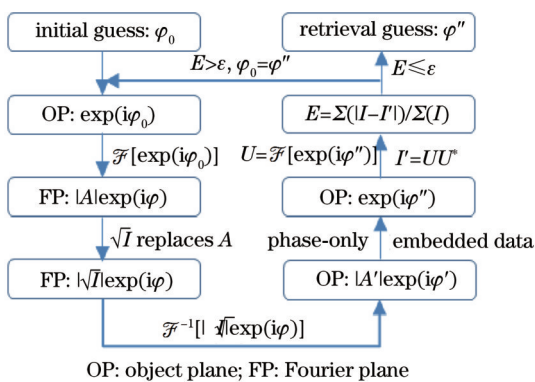


图 13 嵌入式数据迭代傅里叶变换算法流程图

Fig. 13 Flow chart of iterative Fourier transform algorithm based on embedded data

嵌入式数据比例越高,代表约束力越强,收敛速度越快,以 4 阶相位编码为例进行了模拟,结果如图 14 所示^[86]。但是嵌入式数据都是已知的,并不含有编码信息量,过高比例的嵌入式数据在信息页编码中会降低

编码率,因此不得不平衡编码率和相位重建速度的关系。

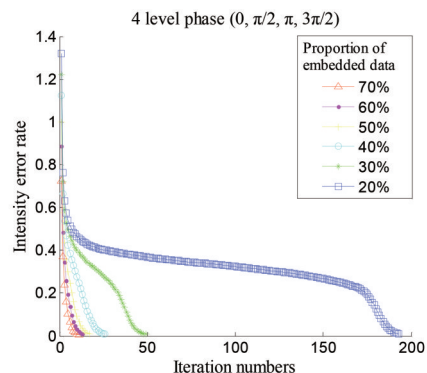


图 14 嵌入式数据比例与迭代次数的关系^[86]

Fig. 14 Relationship between embedded data proportion and iteration numbers^[86]

本文作者团队设计了一个记录灰度图像的实验,即将灰度图编码成很多 4 阶相位图,每幅相位图都包含 50% 嵌入式数据,记录并重建这些相位图,再解码

生成灰度图进行对比,结果如图 15 所示^[116]。直接进行相位重建的图像误码率很高,约为 87%,而进行了 10 次迭代计算后,图像误码率约为 4.7%。在编码没有

加入校验码的情况下,这个结果是可被接受的,可以通过加 BCH 校验码进行误码的校正^[117]。

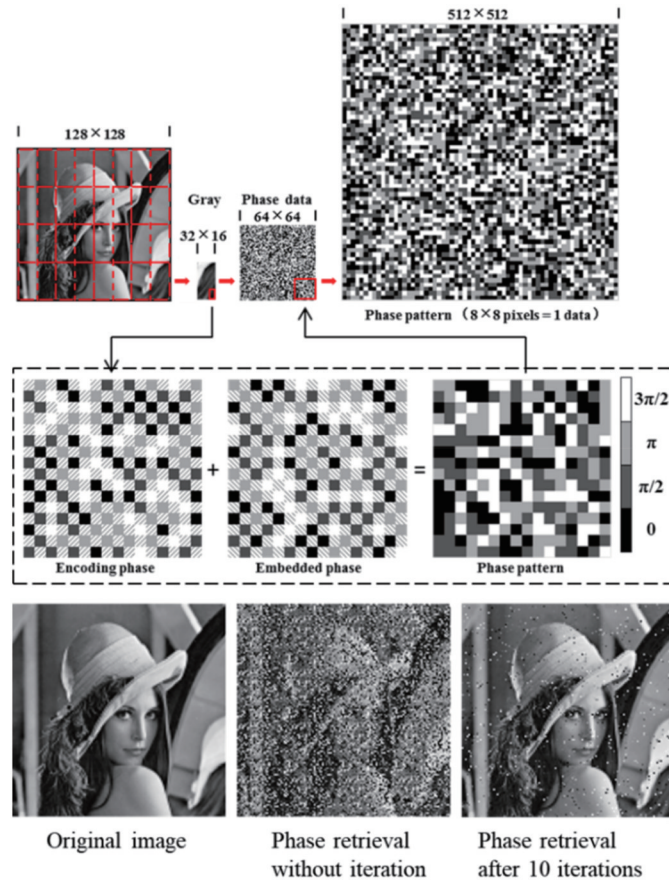


图 15 相位重建算法恢复图像的编码设计与实验结果^[116]

Fig. 15 Coding design and experimental results of phase reconstruction algorithm for image restoration^[116]

为了解决嵌入式数据占用编码率的问题,提出利用同轴系统特有的优势,将嵌入式数据编入参考光中。因为参考光本身在记录和读取时都必须已知,因此该方法没有额外消耗,却可以提高信息页的编码率。也只有同轴系统,最终可以使参考光和信息光同时通过透镜在探测器上进行傅里叶变换,光路设计如图 16 所示。这种方法需要注意的是,重建光中的参考光和信息光的强度并不一致,可以通过加入衰减元件对二者

的光强度进行重新分配。由于参考光就是嵌入式数据,因此提高其强度比例可以进一步增加约束力,从而缩短迭代次数。模拟了不同参考光与信息光强度比情况下的 4 阶相位恢复的灰度直方图,如图 17 所示^[118]。可以看出,随着参考光光强占比不断增大,4 阶相位恢复值之间越来越有相互串扰的趋势,在实际实验带有噪声的情况下,就会产生误码。

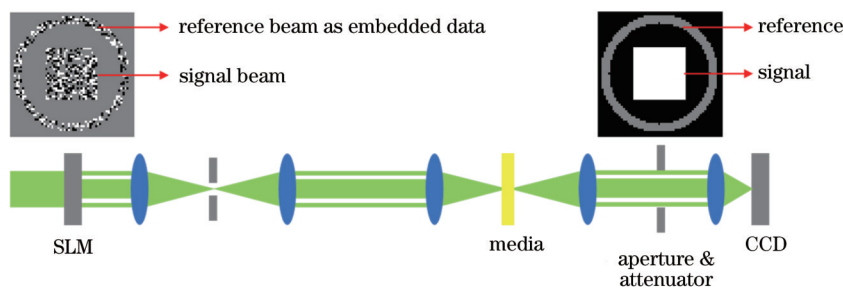


图 16 嵌入式数据的同轴系统优化方案

Fig. 16 Optimization scheme of collinear system based on embedded data

Histograms of original phase retrieval data

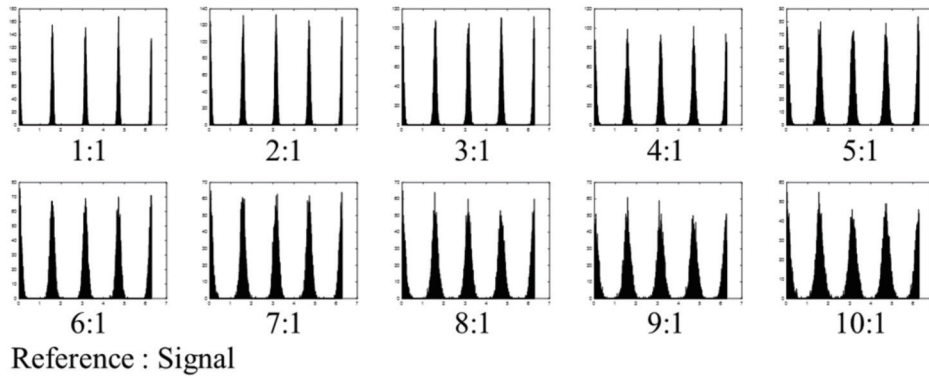


图 17 不同参考光光强占比下的相位重建灰度直方图^[118]

Fig. 17 Gray histograms of phase retrieval under different intensity ratios of reference light^[118]

利用同轴系统进行了实验,研究了不同参考光强度占比对相位重建速度和精度的影响,结果如图 18 所示。随着参考光强度占比提高,迭代次数明显降低,但是过高的参考光强度又会掩盖信息光的分布导致误码率上升。因此在实际使用中,要平衡误码率和迭代次数的关系。

迭代傅里叶变换算法的核心在频谱,根据频谱的延拓性质提出了只记录一倍奈奎斯特间隔频谱进行相位重建的方法,打破了传统相位重建至少需要 2 倍奈奎斯特间隔的限制,可以节省记录材料的消耗以及缩小记录区域,从而提高存储密度。方案如图 19 所示^[119],通过控制光阑大小决定频谱记录的大小。频谱处理的难点在于频谱上的位置信息具有周期性,但是频谱的强度分布不具有周期性,不能直接进行延拓。频谱延拓方法的创新思想是将频谱的强度包络找到,将 1 倍奈奎斯特间隔频谱进行强度归一化,归一化后的频谱才具有延拓特性。根据全息编码规则已知的特

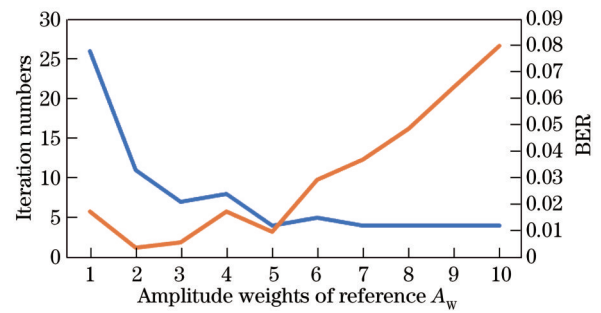


图 18 不同参考光光强占比下的相位重建实验结果

Fig. 18 Experimental results of phase retrieval under different intensity ratios of reference light

性,可以找到一个空间频率和相位编码信息相同的正方形窗,该窗函数已知,其傅里叶变换的强度分布也已知。又因为空间频率相同的两个输入,强度包络具有相似性,因此可以近似认为已知窗函数的强度分布就是未知信息的傅里叶变换强度包络。该思路如图 20 所示^[119]。

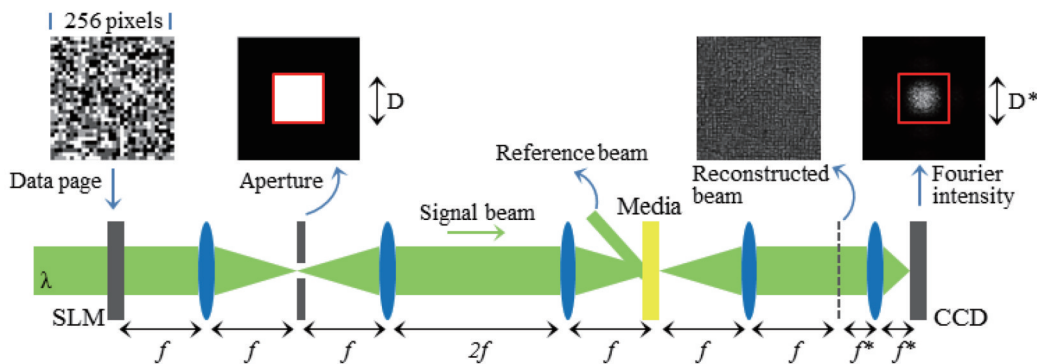


图 19 频谱延拓方案光路示意图^[119]

Fig. 19 Optical path diagram of frequency spectrum extension^[119]

具体实验处理步骤如图 21 所示^[119]。在拍摄到 1 倍奈奎斯特间隔频谱后,首先利用已知强度包络与之相除,得到强度归一化后的频谱,该频谱具有延拓性

质,可以延拓至高频位置,再利用对应大小的已知强度包络与之相乘,即得到延拓后的新频谱。1 倍奈奎斯特间隔频谱延拓前后的相位重建对比结果如图 22 所

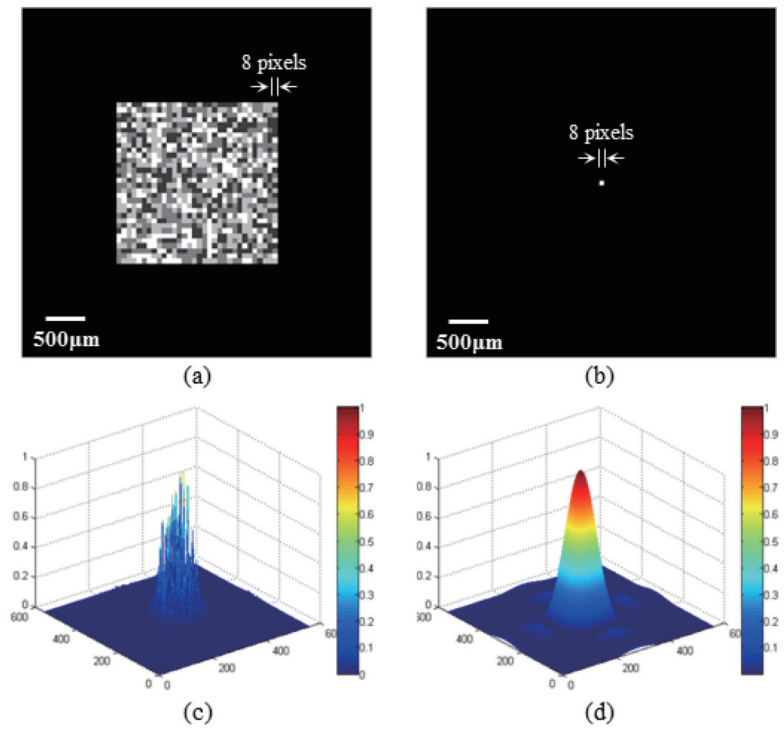


图 20 频谱延拓思路^[119]。(a)未知相位图;(b)已知窗;(c)未知相位的频谱强度图;(d)已知窗的频谱强度图

Fig. 20 Idea of frequency spectrum extension^[119]. (a) Unknown phase pattern; (b) known window; (c) frequency spectrum intensity of unknown phase pattern; (d) frequency spectrum intensity of known window

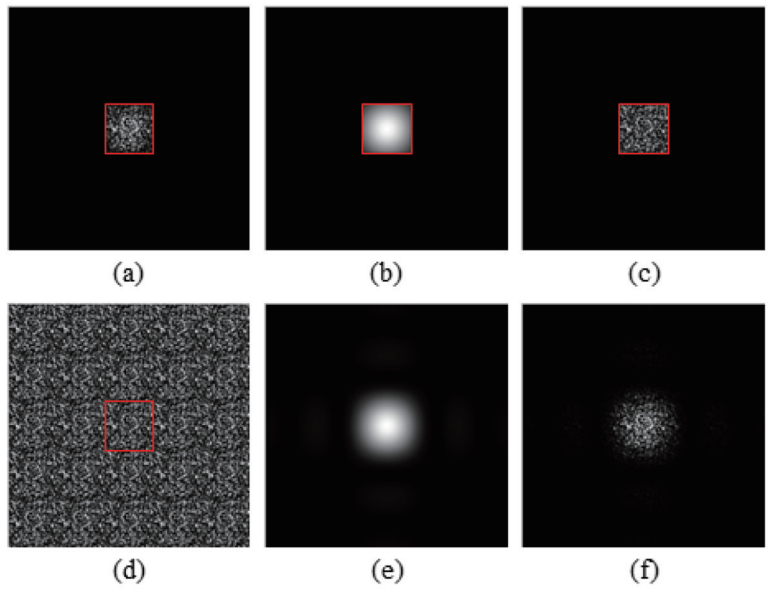


图 21 频谱延拓处理过程^[119]。(a) CCD 拍摄到的 1 倍奈奎斯特频谱(方框表示奈奎斯特大小);(b)奈奎斯特大小矩形窗口的傅里叶强度;(c)强度归一化后的傅里叶频谱;(d)归一化频谱延拓至 5 倍奈奎斯特间隔;(e)已知 5 倍奈奎斯特间隔的强度包络;(f)强度乘积后的新频谱

Fig. 21 Process of frequency spectrum extension^[119]. (a) Fourier intensity with Nyquist size captured by CCD (box denotes Nyquist size); (b) Fourier intensity of rectangular window with Nyquist size; (c) normalized Fourier frequency spectrum; (d) normalized spectrum extension to 5 times Nyquist interval; (e) intensity envelope with a known 5 times Nyquist interval; (f) new spectrum after intensity product

示^[119],明显延拓后相位重建速度更快、精度更高。

3) 无透镜成像的深度学习相位解码
非干涉的迭代相位重建方法虽然系统稳定,但是

无论如何优化,都必须进行几次迭代计算,限制了数据传输速度的进一步提升。通过借鉴深度学习及其在计算成像领域的相关工作^[120-123],本文作者团队提出基于

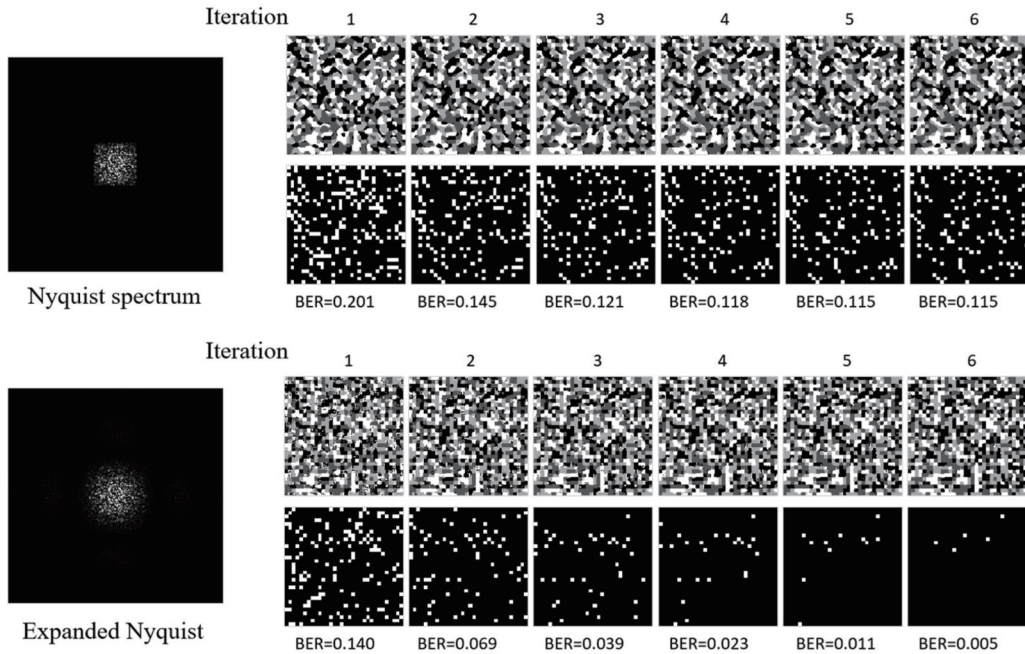
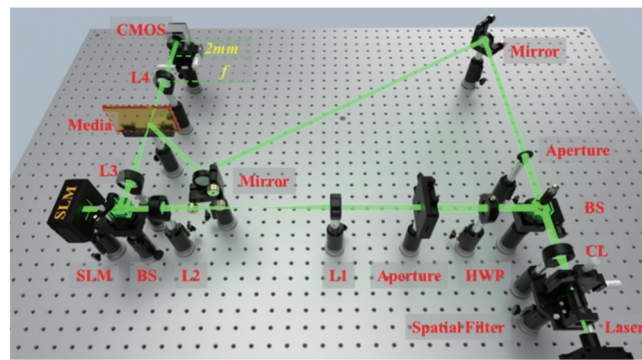


图 22 频谱延拓前后相位重建结果对比^[119]

Fig. 22 Comparison of phase retrieval results without and with frequency spectrum extension^[119]

深度学习的无透镜非干涉相位重建系统,实现相位数据的快速重建^[124]。利用卷积神经网络建立重建光近场衍射图像与相位数据编码页的关系。通过全息存储系统拍摄大量随机编码数据页与对应的近场衍射图像作为训练集,对深度卷积神经网络参数进行训

练。训练完成后,可以直接拍摄近场衍射图像,输入神经网络预测对应的相位编码数据页。实验系统如图 23 所示^[124],利用 SLM 上载随机相位编码数据页调制信息光束,利用 CCD 拍摄再现光的近场衍射图像。



CL: collimating lens; BS: beam splitter; HWP: half wave plate; L1-L4: Relay lens ($f=150$ mm); SLM: spatial light modulator

图 23 深度学习相位重建实验装置图^[124]

Fig. 23 Experimental setup of phase retrieval based on deep learning^[124]

构建一个端到端的卷积神经网络^[121],神经网络参数优化过程如图 24 所示。按照设计的编码规律生成一系列相位编码图像作为真值,将相位图像上载到光学实验系统的 SLM 对信息光进行调制。经过全息存储系统的材料记录与再现过程后,获取带有编码信息的再现光。再现光束在自由空间中传输一段距离后被光电探测器捕获,得到近场衍射强度图。由于衍射作用,强度图像中将存在与相位信息高度相关的强度特征分布。利用神经网络探测该衍射特征并建立与相位

数据页的相关关系。具体的做法是,将近场衍射图像作为卷积神经网络的输入,对应相位编码值作为卷积神经网络输出,对神经网络参数进行优化。神经网络的输出预测结果与相位真值之间产生的差称之为损失函数。利用合适的优化算法指导神经网络参数优化,使得目标损失函数不断收敛。当损失函数收敛到一定程度时,认为神经网络完成训练。训练完成后,对于新的未知近场衍射图像,直接输入到神经网络即可得到对应的相位数据页,即完成了相位数据的解码过程。

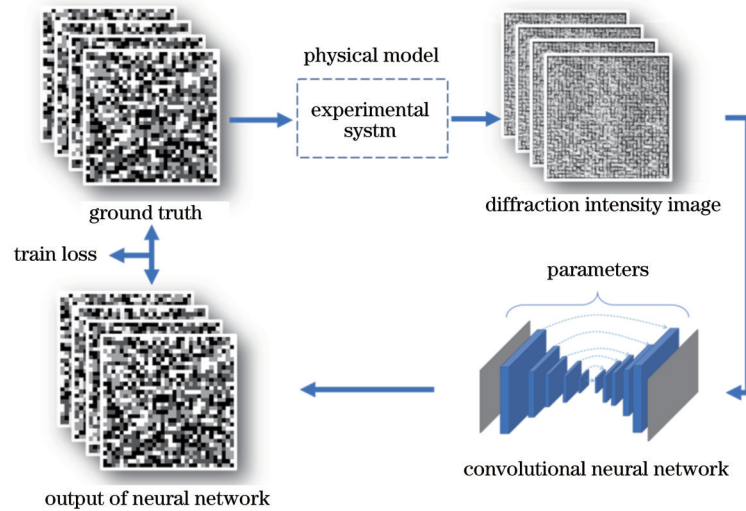


图 24 卷积神经网络训练过程
Fig. 24 Training process of convolution neural network

生成 10000 幅相位数据页并输入到实验系统获取对应的衍射强度图像。强度相位图像对作为神经网络的数据集,其中 90% 用于神经网络参数训练,10% 作为测试集测试神经网络的泛化性能。不同训练轮数下,训练集和测试集的平均损失函数和 BER 如图 25 所示^[124]。实验中 1000 幅测试数据的平均误码率为 0.1%,与迭代相位重建方法(误码率为 4.7%)相比,相位重建精度提高 47 倍,充分证明了基于无透镜成像系统的深度学习相位解码的优势。

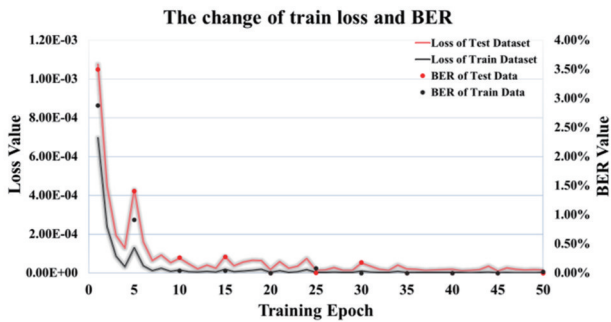


图 25 训练后的实验结果^[124]
Fig. 25 Experimental results after training^[124]

利用基于端到端神经网络模型进行相位重建,需要大量的训练数据对模型进行训练。但是神经网络的训练过程为离线过程。训练完成后,可以直接利用神经网络对相位进行在线解码,适合全息存储系统对数据传输速率的要求。该方法不仅能对纯相位、纯振幅进行解码和降噪,也可以通过设计模型对复振幅信息进行重建,从而实现更高容量的存储。通过对编码图像与近场衍射图像的特征分析,可以进一步引入图像切割、编码限制条件设置等方法降低深度学习训练集数据量。还可以通过对系统噪声进行分类提取、多重降噪,进一步提高系统的噪声容限。

3.3 偏振调制方法

3.3.1 琼斯矩阵与偏光全息张量理论

偏振也是光波的基本属性之一,能够实现光波偏振信息记录和再现的全息技术称为偏光全息。1974 年, Kakichashvili^[125]首次提出利用偏振全息的方式在偏振敏感的光致各向异性材料中记录光场的偏振信息,这是第一次利用偏振光场与光致各向异性材料的相互作用记录光场偏振状态的方法。偏光全息的理论和理论提出之后,偏光全息有了快速的发展,成为全息技术研究的热点之一,后来 Nikolova 等^[126]和 Todorov 等^[127]经过一系列研究总结并完善了基于琼斯理论的偏光全息理论。

然而,基于琼斯理论描述的偏光全息理论并不完备,该理论只能正确地描述在小角度干涉情况下的偏光全息性质,对于具有较大干涉角的偏光全息情况,该理论无法描述。

2011 年, Kuroda^[128]提出了基于张量描述的新偏光全息理论,解决了描述任意干涉角度的偏光全息的理论描述。

假设偏振敏感的全息材料由具有各向异性极化率的杆状分子组成,曝光前,因为杆状分子随机分布在材料中,材料宏观上表现出各向同性,其介电系数为常数。通过曝光对偏振光场的吸收,部分分子随光解作用变为各向同性的球型分子,由于吸收光解的变化具有偏振敏感特性,原来随机分布的分子均匀性随偏振干涉光场的曝光发生改变,宏观上表现出光致各向异性的性质变化。曝光后材料的介电张量表达式为

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \epsilon_r \mathbf{I} + A |\mathbf{E}|^2 \mathbf{I} + B (\mathbf{E}\mathbf{E}^* + \mathbf{E}^* \mathbf{E}), \quad (1)$$

式中: \mathbf{I} 表示单位张量;系数 A 和 B 是光场导致的介电张量变化中标量和张量部分的系数,代表了介电张量的各向同性变化和各向异性变化,分别表示了材料对强度分布的响应和偏振状态分布的响应。再现过程用

严格满足布拉格条件的偏振光作为读出光对偏光全息进行再现,将曝光后的介电张量代入麦克斯韦波动方程,并求解耦合波方程,可以得到再现光波的表达式为

$$F_+ \propto X - (X \cdot \hat{k}_+) \hat{k}_+ = X_+ + [X_- - (X_- \cdot \hat{k}_+) \hat{k}_+], \quad (2)$$

式中,

$$\begin{cases} X = X_+ + X_- \\ X_+ = B(G_+^* \cdot F_-) G_+ \\ X_- = A(G_+ \cdot G_-^*) F_- + B(G_+ \cdot F_-) G_-^* \end{cases}。$$

新的偏光全息理论通过引入介电张量描述光致各向异性材料在偏振光场中的变化,将 2×2 的琼斯矩阵

变为 3×3 的介电张量描述材料与偏振光场的作用,利用麦克斯韦波动方程对偏光全息的记录和再现过程进行矢量描述,可以实现任意偏振光波、任何干涉角度下偏光全息的记录与衍射特性分析。

3.3.2 偏光全息的规律一致性

利用张量描述的偏光全息理论突破了传统琼斯理论对于干涉角度的限制,可以研究任意干涉角度下,任意偏振状态的光波的偏光全息的再现特性。

首先,在线偏振光记录和再现情况下,偏光全息的记录和衍射规律如表 1 所示。

表 1 线偏振光偏光全息记录与再现光波

Table 1 Recording and reconstruction wave of linear polarization holography

Record		Reading	
Reference (G_-)	Signal (G_+)	Reference (F)	Signal (G_F)
\hat{s}	$\alpha \hat{s} + \beta \hat{p}_+$	\hat{s}	$B(\alpha \hat{s} + \beta \hat{p}_+) + (A + B)\alpha \hat{s}$
		\hat{p}_-	$B\beta \cos \theta \hat{s} + A\alpha \cos \theta \hat{p}_+$
\hat{p}_-	$\alpha \hat{s} + \beta \hat{p}_+$	\hat{s}	$A\beta \cos \theta \hat{s} + B\alpha \cos \theta \hat{p}_+$
		\hat{p}_-	$B(\alpha \hat{s} + \beta \hat{p}_+) + (A + B)\alpha \cos \theta \hat{s}$

由表 1 可以得到如下结论:

1) 一般情况下再现信号光波的偏振状态与记录信号光波不同。

2) 综合表 1 中第一行和第四行,只有在满足 $A + B = 0$,且记录、再现参考光波的偏振态一致时,信号光波的偏振状态才可以忠实地再现出来。即

$$G_F \propto \alpha \hat{s} + \beta \hat{p}_+ = G_+。 \quad (3)$$

3) 表 1 中间两行中,再现参考光波的偏振态与记录参考光波的相垂直时,记录信号光波的偏振分量参数 α 和 β 在再现信号光波位置交换了。在满足干涉夹角为 $\pi/2$ 时可得

$$G_F = 0, \quad (4)$$

即出现了偏光全息特有的正交“零再现”现象。

其次,对于圆偏振光,偏光全息的记录和衍射规律如表 2 所示。

表 2 中的公式虽然复杂,但只需注意 $A + B$ 项,可得到与线偏振光相同的结论:一般情况下再现信号光波的偏振状态与记录信号光波不同,在满足 $A + B = 0$ 时表 2 可以简化为表 3。

由表 2 和表 3 可以得出(当 $A + B = 0$ 时)以下结论:

1) 再现参考光波的圆偏振态与记录参考光波的相一致时,记录信号光波的偏振状态才可以忠实地再现出来。

表 2 圆偏振光偏光全息记录与再现光波

Table 2 Recording and reconstruction wave of circular polarization holography

Record		Reading	
Reference	Signal	Reference	Signal (G_F)
L	r_+	r_-	$\frac{1}{2}(A + B)(1 - \cos^2 \theta)r_+ + \frac{1}{2}(A + B)(1 - \cos \theta)^2 L_+$
		L	$\left[2B + \frac{1}{2}(A + B)(1 + \cos^2 \theta) - (A - B)\cos \theta\right]r_+ + \frac{1}{2}(A + B)(1 - \cos^2 \theta)L_+$
r_-	L_+	r_-	$\left[2B + \frac{1}{2}(A + B)(1 + \cos^2 \theta) - (A - B)\cos \theta\right]L_+ + \frac{1}{2}(A + B)(1 - \cos^2 \theta)r_+$
		L	$\frac{1}{2}(A + B)(1 - \cos^2 \theta)L_+ + \frac{1}{2}(A + B)(1 - \cos \theta)^2 r_+$

2) 再现参考光波与记录参考光波的圆偏振态相互正交时,没有再现信号光波产生,即出现正交“零再现”现象。

最后,对于椭圆偏振光,偏光全息的记录数据比线偏振和圆偏振更为复杂,但是更能描述完全偏振光的一般形式,任意椭圆偏振光可以写为以下公式的形式:

$$\begin{cases} W_s = a_1 s + b_1 e^{i\varphi_1} p \\ W_R = a_2 s + b_2 e^{i\varphi_2} p \\ F_R = a_3 s + b_3 e^{i\varphi_3} p \end{cases} \quad (5)$$

将以上椭圆形式代入偏光全息衍射公式,可以得到再现光场为

$$F_S \propto \eta \left[a_2 a_3 + b_2 b_3 e^{i(-\varphi_2 + \varphi_3)} \right] (a_1 s + b_1 e^{i\varphi_1} p) + (\xi + \eta) \left[a_1 a_2 a_3 s + b_1 b_2 b_3 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_3)} \cos^2 \beta p \right] + \cos \beta \left\{ \left[\xi a_2 b_3 e^{i(\varphi_2 + \varphi_3)} + \eta a_3 b_2 \right] e^{-i\varphi_2} p + \left[\eta a_2 b_3 e^{i(\varphi_2 + \varphi_3)} + \xi a_3 b_2 \right] b_1 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} s \right\} \quad (6)$$

可以看到,对椭圆偏振光的全息再现,结果偏振状态比较复杂,影响参量很多,为了更清晰地研究偏光全息的特性,重点关注其偏光全息特有的“零再现”现象。通过式(6)可以得出再现光波“零再现”的条件为

$$\begin{cases} a_2 a_3 + b_2 b_3 e^{i(-\varphi_2 + \varphi_3)} = 0 \\ \xi + \eta = 0 \\ \beta = \pi/2 \end{cases} \quad (7)$$

表 3 A+B=0时圆偏振光偏光全息记录与再现光波
Table 3 Recording and reconstruction wave of circular polarization holography with A+B=0

Record		Reading	
Reference	Signal	Reference	Signal (G_r)
L_-	r_+	r_-	0
		L_-	$2B(1 + \cos \theta)r_+$
r_-	L_+	r_-	$2B(1 + \cos \theta)L_+$
		L_-	0

以上公式说明,对于椭圆偏振光也存在正交“零再现”现象,但是需要同时满足3个条件:读取参考光与记录参考光的偏振状态正交;达到A+B=0的条件;干涉角度为 $\pi/2$ 。

线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光均属于完全偏振光,利用新的偏光全息系统研究了三种完全偏振光记录的偏光全息的记录和衍射特性,得到并通过实验验证了偏光全息理论的正确性。通过对偏光全息记录和再现规律的研究,可以发现从线偏振光、圆偏振光到椭圆偏振光的偏光全息记录和衍射具有统一的规律。

对于大角度干涉角度记录的偏光全息,一般情况下,任意偏振态记录的偏光全息只有在满足“A+B=0”的条件才能实现信号光的忠实再现,这是从线偏振光到圆偏振光和椭圆偏振光记录的偏光全息共同的规律。其中对于椭圆偏振光,忠实再现的条件更复杂一些,除了以上条件还需要考虑干涉角度或者长短轴的规律。

正交“零再现”现象是偏光全息特有的现象,从线偏振光、圆偏振光到椭圆偏振光的偏光全息中均发现了此现象。其中椭圆偏振光可以看作最普遍的偏振光,线偏振光和圆偏振光可以看作是椭圆偏振光的特殊情况,因此椭圆偏振光正交“零再现”的条件是最苛刻的,需要达到式(7)描述的3个条件;当椭圆偏振光

的长短轴一致,即记录光波为圆偏振光时,其正交“零再现”的条件只需要满足式(7)描述的第一和第二个条件;当椭圆偏振光变为更特殊的线偏振光时,其正交“零再现”的条件进一步放宽,只需要满足式(7)描述的最后一个条件即可。

总结以上讨论可以得出,线偏振光和圆偏振光实际上是椭圆偏振光的特殊形式。同样,由线偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光记录的偏光全息在记录和衍射特性上也具有规律上的延续性。虽然具体的表现形式不一样,但是由完全偏振光记录的偏光全息的记录和衍射性质具有规律上的统一性。

3.3.3 线偏振调制实现四通道偏振复用

全息记录中的复用技术是提高全息记录密度的关键技术之一,通过偏光全息的理论可以发现,线偏振光记录的偏光全息具有强烈的偏振敏感特性,利用这种敏感特性可以实现四通道偏振复用的全息方案,将偏光全息的记录密度扩大四倍。

偏振复用四通道全息存储技术是基于线偏振光记录的偏光全息的正交“零再现”衍射特性。按照新的偏光全息理论分析,线偏振光的衍射特性如表4所示,记录偏光全息时,在材料内部的夹角为 $\pi/2$ 时,在不同读取光进行再现时,会出现完全不同的结果。当读取光与参考光偏振一致时,信号光波的偏振态可以正确再现,当读取光与参考光偏振态正交时,再现信号为零,即出现了没有再现光的情况,这就是偏光全息特有的正交“零再现”现象。依据线偏振光记录的偏光全息的正交“零再现”现象,根据表4可以设计四通道偏振复用全息记录方案,如表5所示。

由表5可知,对于通道 H_1 和 H_2 ,信号光首先分别用正交的p偏振光和s偏振光编码,两束正交偏振的信号光通过合束棱镜合成一束复合光波信号,用s偏振的参考光进行记录,两束光波的夹角为 $\pi/2$ 以满足正交“零再现”的条件。对于通道 H_3 和 H_4 采取同样的方案,正交的信号光首先完成合束之后,用p偏振的参考光进行偏光全息记录。根据表4最后一列的内容,在满足线偏振光全息正交“零再现”的条件下,正交的偏振信号光($U_{1s}\hat{p}_s$ 和 $U_{2s}\hat{s}$)只有在读取光为s偏振($U_R\hat{s}$)时才能重建;而信号光($U_{3s}\hat{p}_s$ 和 $U_{4s}\hat{s}$)只有在读取光为p偏振($U_R\hat{p}_R$)才能得到重建。因此四个通道的全息数据信息不会出现相互重叠干扰的情况。

表 4 线偏振光记录的偏光全息的衍射特性

Table 4 Diffraction properties of polarization holography recorded by linearly polarized wave

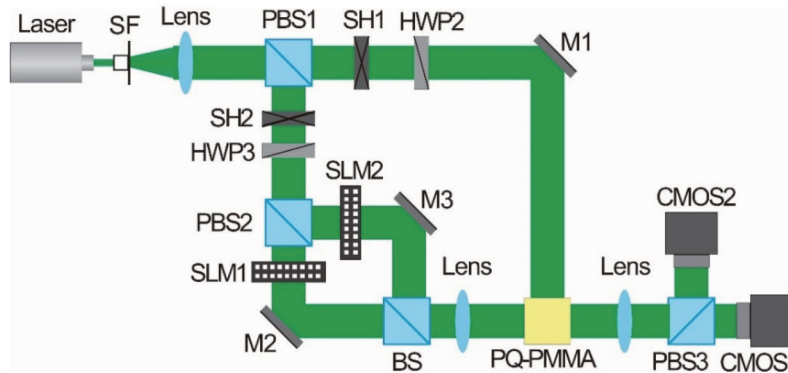
Record		Reading		Reconstruction	
G_+	G_-	F	G_F	$G_F(\pi/2)$	
$G_+\hat{s}$	$G_-\hat{p}_-$	$G_-\hat{s}$	$BG_+\cos(\theta_+-\theta_-)\hat{p}_+$	0	
		$G_-\hat{p}_-$	$BG_+\hat{s}$	$BG_+\hat{s}$	
$G_+\hat{p}_+$	$G_-\hat{s}$	$G_-\hat{s}$	$BG_+\hat{p}_+$	$BG_+\hat{p}_+$	
		$G_-\hat{p}_-$	$BG_+\cos(\theta_+-\theta_-)\hat{s}$	0	
$G_+\hat{s}$	$G_-\hat{s}$	$G_-\hat{s}$	$(A+2B)G_+\hat{s}$	$(A+2B)G_+\hat{s}$	
		$G_-\hat{p}_-$	$AG_+\cos(\theta_+-\theta_-)\hat{p}_+$	0	
$G_+\hat{p}_+$	$G_-\hat{p}_-$	$G_-\hat{s}$	$AG_+\cos(\theta_+-\theta_-)\hat{s}$	0	
		$G_-\hat{p}_-$	$G_+[(A+B)\cos^2(\theta_+-\theta_-)+B]\hat{p}_+$	$BG_+\hat{p}_+$	

表 5 四通道偏振复用全息记录方案

Table 5 Scheme of four-channel polarization multiplexing holographic recording

Chanel	Record	Reading	Reconstruction
H_n	U_s	U_R	$U_F(\pi/2)$
H_1	$U_{1s}\hat{p}_s$	$U_R\hat{s}$	$U_{1s}\hat{p}_s$
H_2	$U_{2s}\hat{s}$	$U_R\hat{s}$	$U_{2s}\hat{s}$
H_3	$U_{3s}\hat{p}_s$	$U_R\hat{p}_R$	$U_{3s}\hat{p}_s$
H_4	$U_{4s}\hat{s}$	$U_R\hat{p}_R$	$U_{4s}\hat{s}$

作为实验验证,建立了图 26 所示的实验光路^[129]。在 SLM(SLM1 和 SLM2)上分别加载字母“A”(p-偏振)和字母“B”(s-偏振)作为信号光,参考光为 s-偏振的平面波。第一幅偏光全息图记录完成之后,空间光调制器加载的图像变更为字母“C”(SLM1,p-偏振)和字母“D”(SLM2,s-偏振),参考光改变为 p-偏振,记录第二幅偏光全息图。在重建时,分别用不同偏振的参考光对图像进行重建,重建图像的 s-偏振和 p-偏振成分通过偏振分束棱镜分离之后通过两个互补金属氧化物半导体(CMOS)相机成像。



SF: beam expander; PBS: polarization beam splitter; SH: electronic shutter; M: plane reflector; BS: combined beam prism; CMOS: complementary metal oxide semiconductor

图 26 四通道偏振复用全息记录光路图^[129]

Fig. 26 Optical path of four-channel polarization multiplexed holographic recording^[129]

实验结果如图 27 所示^[129],其中,图 27(a)~27(d)是在全息记录之前的透射图像,即光路调整好之后,不放全息材料,直接通过 CMOS 相机成像的结果,此图像作为原始信号图像。图 27(e)~27(h)是偏光全息重建的图像,其中图 27(e)、27(f)是用 s-偏振光进行重建的图像,图 27(g)、27(h)是用 p-偏振光进行重建的图像。从实验结果中可以得出重建图像跟原始图像是一致的,在重建图像中,字母“B”的重建图像和字母“D”的重建图像有一点重叠,分析其主要原因是字母“B”和“D”的相似度很高,导致记录的全息光栅有一些相

互重叠。偏光全息可以实现在记录材料的同一个位置正确地记录和重建四个通道的全部信息。

4 全息存储材料

4.1 PQ/PMMA 材料

振幅、相位和偏振的调制理论均需要存储介质来进行验证。传统的全息记录材料一般都对振幅和相位有响应,但是对偏振响应得不多。本文作者团队在传统材料的研究基础上,侧重对材料的偏振特性进行了研究。

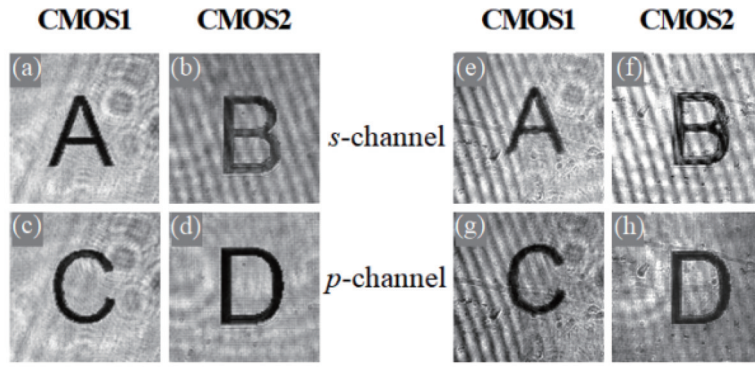


图 27 四通道偏振复用全息记录实验结果^[129]。(a)~(d)全息记录之前,图像直接在 CMOS 相机上的成像图,作为原始信号;(e)~(h)全息记录后,用不同偏振读取光进行全息重建的图像

Fig. 27 Experimental results of four-channel polarization multiplexing holographic recording^[129]. (a)-(d) Imaging maps of image directly on CMOS camera as original signal before holographic recording; (e)-(h) images of holographic reconstruction with different polarization reading lights after holographic recording

全息存储材料包括有机材料和无机材料两大类,其中无机材料,例如光折变晶体,具有衍射效率高、响应时间短等优点,光折变效应是光电材料在光辐照下由光强的空间分布引起材料折射率相应变化的一种非线性光学现象。在光折变过程中,自由载流子迁移主要有扩散、漂移和光生伏特效应三种机制。但是这类材料生产条件苛刻,且成本过高,限制了其市场化。同时由于其具有可擦除性,不适用于信息的永久存储^[130-131]。有机材料种类较多,其中比较受关注的有光折变聚合物材料、偶氮类聚合物材料、光致变色材料、光致聚合物材料等^[132-135]。

近些年来,光致聚合物材料因其成本低廉、易于制备、组分选择灵活且具备可设计性等优势受到了人们的关注。对比其他的有机材料,光致聚合物材料是适合进行一次写入永久读取的信息存储材料,其不仅具有高折射率调制度和衍射效率,还能通过掺杂改善性能,在全息存储领域具有很大优势。典型的光致聚合物系统通常包括光敏剂、单体和光引发剂,光敏剂和光引发剂可以形成光敏引发体系,可以在光致聚合过程中促进单体的聚合^[136]。菲醌染料掺杂聚甲基丙烯酸甲酯(PQ/PMMA)材料,因具备诸多优良的特性,是一种典型的光致聚合物材料。其在制备过程中单体的聚合反应和曝光过程中的光化学反应分开,使得曝光过程中的收缩可忽略不计,可制备成厚材料;采用双聚合物模式,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,故而材料的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,提高了材料的选择范围;可以通过掺杂其他组分改善其特性等,这方面研究受到了广泛的关注,尤其是偏振全息存储材料的研究。

2009年, Trofimova等^[137]制备了PQ/PMMA材

料,并将其应用于偏振全息记录。通过红外光谱等技术,证实了是PQ与基底的光化学反应产物导致双折射的出现。同时研究了双折射与染料PQ的浓度和温度之间的关系,以及外加辐射对双折射的影响。这是首次关于PQ/PMMA材料具有光致各向异性的报道。2014年, Lin等^[138]通过实验研究了厚PQ/PMMA光致聚合物材料记录偏振全息图的特性。分别用正交线偏振光和圆偏振光对2 mm厚的PQ/PMMA样品的全息图记录进行了实验表征。上述结果表明,PQ/PMMA材料既能用于传统全息记录振幅和相位,也可以用于记录光的偏振状态。因此,本文作者团队从该材料的全息记录性能提升、制作工艺、稳定性等多方面进行了研究。

PQ/PMMA材料的制作流程如图28所示。首先准备一个棕色的玻璃反应瓶,将甲基丙烯酸酯(MMA)溶液、偶氮二异丁腈(AIBN)以及菲醌(PQ)按照一定的比例如100:1:1混合在棕色反应瓶中。为了消除AIBN在热分解过程中产生的氮气以及更好地提高PQ在MMA溶液中的溶解度,将该反应瓶置于能够温控的超声波清洗机中,振荡一定时间至PQ完全溶解,然后进行过滤,得到去杂质后的材料混合物,然后将其溶液放入带磁力搅拌棒的恒温水浴锅中进行热引发反应,待溶液反应变成黏稠甘油状后,将其倒入事先准备好的玻璃板和硅胶板以及夹具组成的容器中。将装有光致聚合物的容器放入温度可调的恒温风干箱内固化20 h后完成聚合反应,然后将容器放入冰箱冷冻一段时间终止聚合反应,取出容器并拆开玻璃板和硅胶板,得到光学性能良好的块状黄色透明材料,将材料用锡纸包起来室温保存待用。PQ/PMMA材料的性能如反应灵敏度、衍射效率、皱缩率等不仅与掺杂材料的比例有关,也与超声混合、搅拌、烘烤等过程中的温度和时长有关,本文作者团队对这些步骤和工艺进行了大量的实验研究,掌握了控制材料性能的

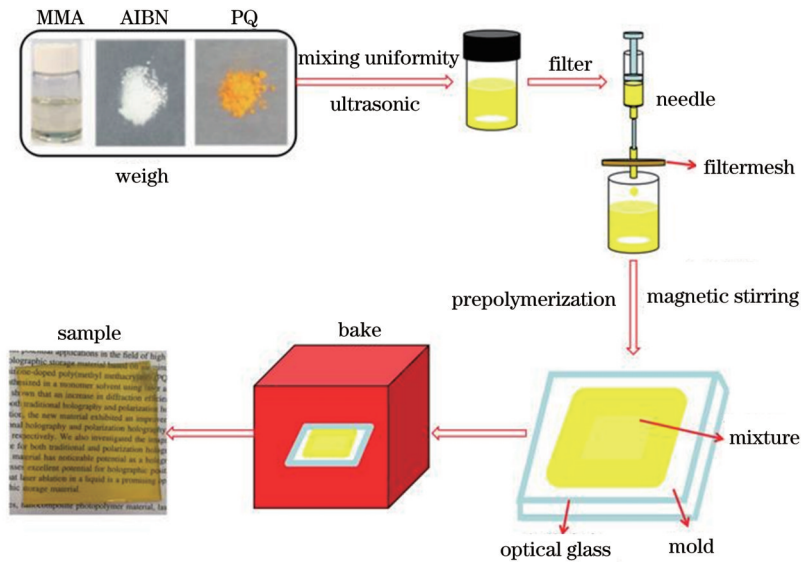


图 28 PQ/PMMA 材料制备流程图

Fig. 28 Preparation flow chart of PQ/PMMA materials

规律。

4.2 感光剂掺杂优化 (Irgacure 784-doped PMMA)

在传统 PQ/PMMA 材料制备基础上也可以通过掺杂来提高其偏振相应方面的性能。Li 等^[139]通过在 PQ/PMMA 中掺杂金纳米棒,改善了材料的光致双折射,并从理论上给出了金纳米棒工作机制的解释模型。金纳米棒的扩散促进效应增加了线偏振光致双折射,这对 PQ/PMMA 光聚合物体系的开发具有很好的参考价值。本文作者团队也通过掺杂铝和二氧化硅纳米颗粒,改善了材料的光致双折射^[140-141]。掺杂纳米组分的方法对提高 PQ/PMMA 的记录性能也有很好的参考价值。

同时还有对感光剂进行研究以替代 PQ 作为 PMMA 材料体系新的感光剂以提升材料的偏振全息性能。本文作者团队用 Irgacure 784 代替菲醌^[142],研究了 Irgacure 784 掺杂的聚甲基丙烯酸甲酯光致聚合物 (Irgacure 784/PMMA) 的全息特性,并与 PQ/PMMA 进行了比较,发现该材料在衍射效率、折射率调制和记录灵敏度方面具有更好的性能且对偏振敏感。通过在 Irgacure 784/PMMA 中使用 532 nm 的激光照射,成功实现了偏振全息的记录,并进一步研究了 Irgacure 784/PMMA 光致聚合物材料的光引发剂浓度和记录过程中使用不同强度的光对衍射效率的影响,为该材料在偏振全息存储方面的进一步发展奠定了基础。

4.3 单体掺杂优化

本文作者团队证明了通过引入第二种单体试剂来提高 PQ/PMMA 材料的光学性能具有可行性^[143-144]。单体是光致聚合物材料的基本组成成分,在选择共聚单体上,遵循了“相似相溶”的理论。推测掺杂结构中含有与 PQ 分子极性相近的官能团,可能对 PQ 分子具

有高溶解度。同时为了更好地将掺杂剂引入光聚合物体系,需要掺杂剂结构中含有不饱和碳碳双键。同时考虑到光敏剂 PQ 为醌类,所以选择了几种共聚单体具有芳香性的基团,同时含有不饱和双键,可以与 MMA 单体发生共聚反应,这样可以更好地引入到体系中。

引入 THFMA 共聚单体可以增加 PQ 的掺杂质量比,如图 29 所示^[143]。成功地制备了一个基于 PQ/PMMA 材料的新型材料来提高 PQ/PMMA 材料的偏振全息性能。实验结果表明,通过引入掺杂剂 THFMA,新材料具有较高的衍射强度和较高的灵敏度。通过这种方法,结合 PQ 自由基与单体分子的概率增加。此外,正交线性偏振记录和高质量的重建图像在 PQ / P(T3M7) 实现。因此提出了选择合适的共聚单体的规则是关键,可进一步提高全息材料。

众所周知,材料的光敏剂的含量与紫外吸收成正比关系,即光敏剂含量越高,相同波长上吸收值越大。紫外可见吸收光谱图如图 30 所示^[143],通过加入第二种单体 THFMA,将材料中 PQ 的质量分数由 0.70% 提高至 1.13%。在 600 nm 以下,PQ 含量越高,相同波长下,吸收值越大。同时在 PQ 含量相同情况下,其吸收值也相当,也表明掺入的共聚单体 THMFA 没有影响材料的光吸收。此图可以很好地说明,本文作者团队成功地提高了光敏剂 PQ 在材料中的含量,从而进一步提高了材料的光学性能。

4.4 材料制作工艺优化

全息存储的介质最终也是光盘形式的,由于材料对绿光敏感,对红光不敏感,因此采用绿光记录和读取数据,红光用于伺服系统,则全息光盘的结构比普通的 CD、DVD 等要复杂一些,如图 31 所示^[145]。基盘刻有

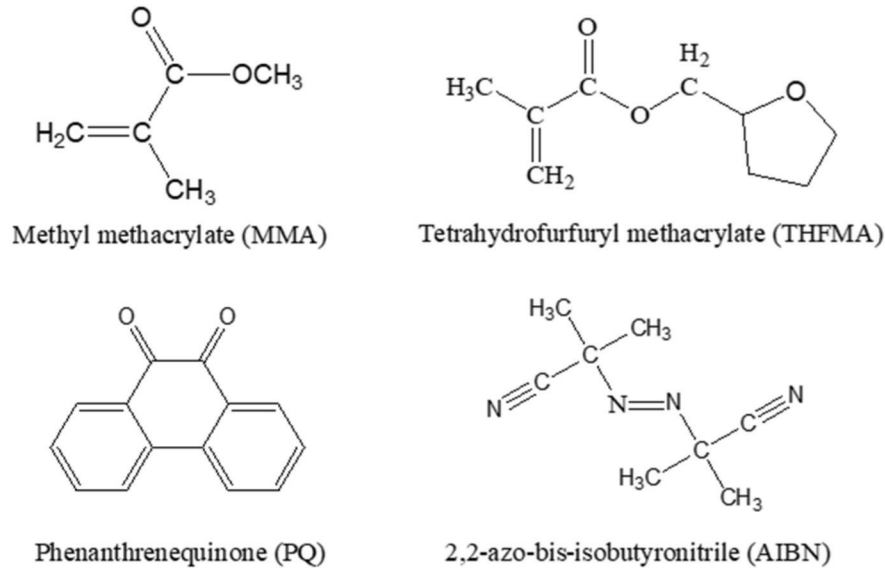


图 29 化学成分的结构示意图^[143]

Fig. 29 Schematic diagram of structure of chemical composition^[143]

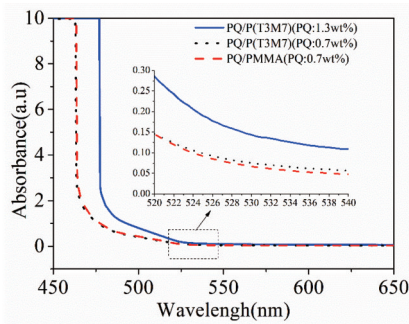


图 30 光致聚合物材料的紫外吸收光谱图^[143]

Fig. 30 Ultraviolet absorption spectra of photopolymer materials^[143]

地址信息,在两个隔离层中间有一个二向色层,用来分开绿光和红光,再往上是光致聚合物材料以及保护层。本文作者团队对二向色层与光致聚合物材料如何结合做了工艺上的优化。在PC基盘上直接镀二向色层是可行的,需要利用低温冷镀膜法。同时分别用灌装法、旋涂法和塑性后粘贴法在二向色层上固定光致聚合物材料,结果如图 32 所示。其中灌装法和旋涂法都因为材料小、分子容易透过二向色层导致PC基盘腐蚀,而先用模具烘烤塑性后再粘贴的方法可以取得较好的效果,最终结合各种工艺制作出了国产自主研发的首张全息光盘样片,如图 33 所示。

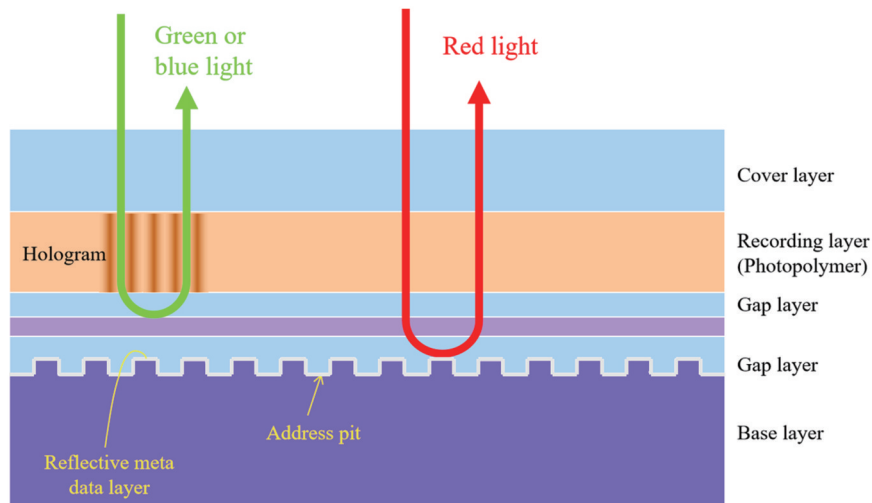


图 31 全息光盘设计结构^[145]

Fig. 31 Design structure of holographic disc^[145]

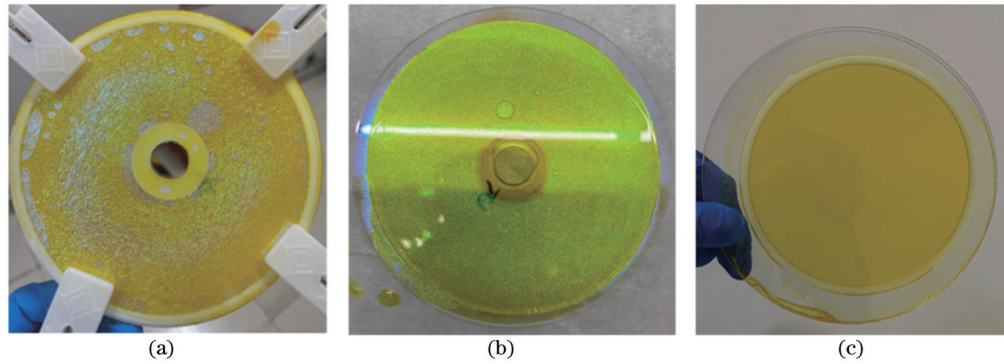


图 32 不同的光盘材料装填工艺。(a)灌装法;(b)旋涂法;(c)塑性后粘贴法

Fig. 32 Different loading processes of optical disc materials. (a) Filling method; (b) spin-coating method; (c) paste method



图 33 国产自主研发的首张全息光盘

Fig. 33 First holographic disc independently developed in China

5 总结与展望

综上所述,多维调制全息存储技术,最大限度地发挥了全息对光的振幅、相位和偏振信息存储的能力,在有效提高全息存储的记录密度的同时,还可以提升数据传送的速率。但是要从根本上克服再现噪声对全息存储密度的影响,缩小实际全息存储密度与理论值的差距,还需要对多维调制高密度全息存储技术开展进一步的研究,开发具有我国自主知识产权的光致聚合物全息存储材料,尤其是可以同时记录光的振幅、相位和偏振信息的偏光全息材料。本文作者深信,随着偏光全息张量理论的研究和深度学习应用研究的进一步深入,在多维调制、深度学习快速读取和复合材料方面将不断取得创新性成果,多维调制全息存储技术研究的新时代会很快到来。全息存储技术产业化研究的进一步深入,将有利于我国抢占光存储知识产权和标准的制高点,推进形成面向大数据归档存储的新型光存储产业。

此外,除了全息存储技术,玻璃存储也是正在布局的冷数据长期存储技术方案之一,DNA 数据存储则更多处于理论阶段。在传统技术方面,固态盘如能突破长期掉电数据保存,进一步降低数据保存成本,也将在冷数据存储中具有更广阔的应用。传统的蓝光盘则在

多层写入上可进行突破,但是工艺难度较大,如果具有高的良品率,在短期内仍能对数据存储压力有所缓解。目前已形成了磁光电一体化的数据存储模式,更多的技术升级和新技术都会陆续加入其中,共同解决大数据爆炸式增长的存储难题。

参 考 文 献

- [1] van Heerden P J. Theory of optical information storage in solids [J]. *Applied Optics*, 1963, 2(4): 393-400.
- [2] Heanue J F, Bashaw M C, Hesselink L. Volume holographic storage and retrieval of digital data[J]. *Science*, 1994, 265 (5173): 749-752.
- [3] Mok F H, Tackitt M C, Stoll H M. Storage of 500 high-resolution holograms in a LiNbO_3 crystal[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(8): 605-607.
- [4] 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.
- [5] Coufal H J, Psaltis D, Sincerbox G T. *Holographic Data Storage*[M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [6] Hesselink L, Bashaw M C. Optical memories implemented with photorefractive media[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1993, 25(9): S611-S661.
- [7] Waldman D A, Butler C J, Raguin D H. CROP holographic storage media for optical data storage greater than $100 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5216: 10-25.
- [8] Schnoes M, Ihas B, Dhar L, et al. Photopolymer use for holographic data storage[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4988: 68-76.
- [9] Horimai H, Tan X D, Li J. Collinear holography[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(13): 2575-2579.
- [10] Zhai Q L, Tao S Q, Zhang T, et al. Investigation on mechanism of multiple holographic recording with uniform diffraction efficiency in photopolymers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(13): 10871-10880.
- [11] Wei H Y, Cao L C, Xu Z F, et al. Orthogonal polarization dual-channel holographic memory in cationic ring-opening photopolymer[J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5135-5142.
- [12] Liu J P, Horimai H, Lin X, et al. Phase modulated high density collinear holographic data storage system with phase-retrieval reference beam locking and orthogonal reference encoding[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 3828-3838.
- [13] Zang J L, Kang G G, Li P, et al. Dual-channel recording based on the null reconstruction effect of orthogonal linear polarization holography[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1377-1380.
- [14] 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.
- [15] Wu A A, Kang G G, Zang J L, et al. Null reconstruction of orthogonal circular polarization hologram with large recording angle[J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8880-8887.
- [16] Wang J, Kang G, Wu A, et al. Investigation of the extraordinary null reconstruction phenomenon in polarization volume hologram[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1641-1647.
- [17] Hong Y F, Kang G G, Zang J L, et al. Investigation of faithful reconstruction in nonparaxial approximation polarization holography[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(36): 10024-10029.
- [18] Zhang Y Y, Kang G G, Zang J L, et al. Inverse polarizing effect of an elliptical-polarization recorded hologram at a large cross angle[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 4126-4129.
- [19] Liu Y, Fan F L, Hong Y F, et al. Volume holographic recording in irgacure 784-doped PMMA photopolymer[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20654-20662.
- [20] Fan F L, Liu Y, Hong Y F, et al. Volume polarization holographic recording in phenanthrenequinone doped poly(MMA-co-BzMA) photopolymer[J]. *Chemistry Letters*, 2018, 47(4): 520-523.
- [21] 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.
- [22] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [23] Leith E N, Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1962, 52(10): 1123-1130.
- [24] Leith E N, Upatnieks J. Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1964, 54(11): 1295-1301.
- [25] Ashkin A, Boyd G D, Dziedzic J M, et al. Optically-induced refractive index inhomogeneities in LiNbO_3 and LiTaO_3 [J]. *Applied Physics Letters*, 1966, 9(1): 72-74.
- [26] Staebler D L, Amodei J J. Coupled-wave analysis of holographic storage in LiNbO_3 [J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(3): 1042-1049.
- [27] Staebler D L, Burke W J, Phillips W, et al. Multiple storage and erasure of fixed holograms in Fe-doped LiNbO_3 [J]. *Applied Physics Letters*, 1975, 26(4): 182-184.
- [28] Ishida A, Mikami O, Miyazawa S, et al. Rh-doped LiNbO_3 as an improved new material for reversible holographic storage[J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 21(5): 192-193.
- [29] Shah P, Rabson T A, Tittel F K, et al. Volume holographic recording and storage in Fe-doped LiNbO_3 using optical pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 24(3): 130-131.
- [30] Stewart W C, Mezrich R S, Cosentino L S. An experimental read write holographic memory[J]. *Radio Corporation of America Review*, 1973, 34: 3-44.
- [31] Amodei J J, Staebler D L. Holographic pattern fixing in electro-optic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 18(12): 540-542.
- [32] Strehlow W C, Dennison R L, Packard J R. Holographic data store[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, 64: 543-544.
- [33] Nishida N, Sakaguchi M, Saito F. Holographic coding plate: a new application of holographic memory[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(7): 1663-1674.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Mok F H. Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(11): 915-917.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Curtis K. Digital holographic data storage prototype[C]//2000 Optical Data Storage. Conference Digest (Cat. No.00TH8491), May 14-17, 2000, Whistler, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2002: 164-166.
- [40] Mok F H, Burr G W, Psaltis D. Spatially and angle-multiplexed holographic random access memory[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1773: 334-345.
- [41] 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.
- [42] Psaltis D, Levene M, Pu A, et al. Holographic storage using shift multiplexing[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(7): 782-784.
- [43] Steckman G J, Pu A, Psaltis D. Storage density of shift-multiplexed holographic memory[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(20): 3387-3394.
- [44] Pu A, Psaltis D. Holographic 3-D disks using shift multiplexing [C]//Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics, June 2-7, 1996, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2002: 165.
- [45] Denz C, Tschudi T, Pauliat G, et al. Volume hologram multiplexing using a deterministic phase encoding method[J]. *Optics Communications*, 1991, 85(2/3): 171-176.
- [46] 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.
- [47] Darsky A M, Markov V B. Angular sensitivity of holograms with a reference speckle wave[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1238: 54-61.
- [48] Barbastathis G, Levene M, Psaltis D. Shift multiplexing with spherical reference waves[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(14): 2403-2417.
- [49] Markov V, Millerd J, Trolinger J, et al. Multilayer volume holographic optical memory[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(4): 265-267.
- [50] D'Auria L, Huignard J P, Slezak C, et al. Experimental holographic read-write memory using 3-D storage[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(4): 808-818.
- [51] 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: Springer, 1978: 217-233.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] Pu A, Psaltis D. High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(14): 2389-2398.
- [55] Bieringer T. Photoaddressable polymers[M]//Holographic data storage. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2000: 209-228.
- [56] Orlov S S, Bjornson E, Phillips W, et al. High transfer rate (1 Gbit/sec) high-capacity holographic disk digital data storage system[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2000. Digest Technical. Postconference Edition. TOPS Vol. 39 (IEEECat. No.00CH37088), May 7-12, 2000, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2002: 190-191.
- [57] Waldman D A, Li H Y S, Horner M G. Volume shrinkage in slant fringe gratings of a cationic ring-opening volume hologram recording material[J]. *Journal of Imaging Science & Technology*, 1997, 41(5): 497-514.

- [58] Suzuki N, Tomita Y, Kojima T. Holographic recording in TiO₂ nanoparticle-dispersed methacrylate photopolymer films[J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(22): 4121-4123.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Hata E J, 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.
- [62] 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.
Tao S Q, Xu M. A study for making a thin silver halide phase hologram with an expectation phase modulation[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(8): 1015-1020.
- [63] 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.
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.
- [64] 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.
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.
- [65] 王玉红, 袁鞞, 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.
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.
- [66] 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.
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.
- [67] 刘友文, 刘立人, 周常河, 等. 双掺杂和三掺杂铈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.
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.
- [68] 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.
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.
- [69] 黄明举, 姚华文, 陈仲裕, 等. 导致光聚合物全息存储布拉格偏移因素的研究[J]. 光子学报, 2002, 31(7): 855-859.
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.
- [70] 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.
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.
- [71] 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.
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.
- [72] 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.
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.
- [73] 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.
Cao L C, He Q S, Yu H B, et al. 10 Gb/cm³ miniaturized volume holographic data storage and related identification system[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(23): 2495-2500.
- [74] 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.
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.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] Waldman D, Butler C, Raguin D. CROP holographic storage media for optical data storage greater than 100 bits/μm²[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5216: 10-25.
- [78] Horimai H, Tan X D. Collinear technology for a holographic versatile disk[J]. Applied Optics, 2006, 45(5): 910-914.
- [79] Horimai H, Tan X D. Advanced collinear holography[J]. Optical Review, 2005, 12(2): 90-92.
- [80] Horimai H, Tan X D. Holographic information storage system: today and future[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(2): 943-947.
- [81] Shih H F. Integrated optical unit design for the collinear holographic storage system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(2): 948-950.
- [82] 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.
- [83] Dhar L, Curtis K, Fäcke T. Coming of age[J]. Nature Photonics, 2008, 2(7): 403-405.
- [84] Wilson W L, Anderson K E, Curtis K R, et al. Toward the commercial realization of high-performance holographic data storage[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5221: 29-37.
- [85] Anderson K, Curtis K. Polytopic multiplexing[J]. Optics Letters, 2004, 29(12): 1402-1404.
- [86] Lin X, Liu J P, Hao J Y, et al. Collinear holographic data storage technologies[J]. Opto-Electronic Advances, 2020, 3(3): 190004.
- [87] Burr G W, Ashley J, Coufal H, et al. Modulation coding for pixel-matched holographic data storage[J]. Optics Letters, 1997, 22(9): 639-641.
- [88] Liu J P, Horimai H, Lin X, et al. Optimal micro-mirror tilt angle and sync mark design for digital micro-mirror device based collinear holographic data storage system[J]. Applied Optics, 2017, 56(16): 4779-4784.
- [89] Heanue J F, Bashaw M C, Hesselink L. Channel codes for digital holographic data storage[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(11): 2432-2439.
- [90] Chen R X, Hao J Y, Yu C Y, et al. Dynamic sampling iterative phase retrieval for holographic data storage[J]. Optics Express, 2021, 29(5): 6726-6736.
- [91] Tajima K, Nakamura Y, Hoshizawa T. High-density recording in holographic data storage system by dual 2-level run-length-limited modulation[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2016, 55(9S): 09SA09.

- [92] Tanaka K, Hara M, Tokuyama K, et al. Improved performance in coaxial holographic data recording[J]. *Optics Express*, 2007, 15(24): 16196-16209.
- [93] Nobukawa T, Nomura T. Design of high-resolution and multilevel reference pattern for improvement of both light utilization efficiency and signal-to-noise ratio in coaxial holographic data storage[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(17): 3773-3781.
- [94] Goertzen B J, Mitkas P A. Error-correcting code for volume holographic storage of a relational database[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(15): 1655-1657.
- [95] Kim J, Wee J K, Lee J. Error correcting 4/6 modulation codes for holographic data storage[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(8S2): 08KB04.
- [96] Nakamura Y, Hoshizawa T. Two high-density recording methods with Run-length limited turbo code for holographic data storage system[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(9S): 09SA01.
- [97] Katano Y, Muroi T, Kinoshita N, et al. Demodulation of multi-level data using convolutional neural network in holographic data storage[C]//2018 Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA), December 10-13, 2018, Canberra, ACT, Australia. New York: IEEE Press, 2019.
- [98] Liu J P, Zhang L, Wu A N, et al. High noise margin decoding of holographic data page based on compressed sensing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7139-7151.
- [99] Brady D J, Choi K, Marks D L, et al. Compressive holography[J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 13040-13049.
- [100] Marim M M, Atlan M, Angelini E, et al. Compressed sensing with off-axis frequency-shifting holography[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(6): 871-873.
- [101] Jin, J, Yang B, Liang K, et al. General image denoising framework based on compressive sensing theory[J]. *Computers & Graphics*, 2014, 38: 382-391.
- [102] 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.
- [103] 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.
- [104] 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.
- [105] Horimai H. Multi-level data write/retrieve by phase-locked collinear holography[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2016, November 2-5, 2016, Wuhan. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2016: AF1J.2.
- [106] 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.
- [107] 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.
- [108] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [109] 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.
- [110] Maiden A M, Rodenburg J M. An improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging[J]. *Ultramicroscopy*, 2009, 109(10): 1256-1262.
- [111] 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.
- [112] 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): 1932-1941.
- [113] Gureyev T E, Nugent K A. Rapid quantitative phase imaging using the transport of intensity equation[J]. *Optics Communications*, 1997, 133(1/2/3/4/5/6): 339-346.
- [114] Volkov V V, Zhu Y, De G M. A new symmetrized solution for phase retrieval using the transport of intensity equation[J]. *Micron*, 2002, 33(5): 411-416.
- [115] Lin X, Hao J Y, Wang K, et al. Single-shot non-interferometric phase retrieval in holographic data storage[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11500: 1150007.
- [116] 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.
- [117] Desset C, Macq B, Vandendorpe L. Block error-correcting codes for systems with a very high BER: theoretical analysis and application to the protection of watermarks[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2002, 17(5): 409-421.
- [118] Hao J Y, Ren Y H, Zhang Y Y, et al. Non-interferometric phase retrieval for collinear phase-modulated holographic data storage[J]. *Optical Review*, 2020, 27(5): 419-426.
- [119] Lin X, Hao J Y, Wang K, et al. Frequency expanded non-interferometric phase retrieval for holographic data storage[J]. *Optics Express*, 2020, 28(1): 511-518.
- [120] Nishizaki Y, Horisaki R, Kitaguchi K, et al. Analysis of non-iterative phase retrieval based on machine learning[J]. *Optical Review*, 2020, 27(1): 136-141.
- [121] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[M]//Navab N, Hornegger J, Wells W M, et al. Medical image computing and computer-assisted intervention-MICCAI 2015. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2015, 9351: 234-241.
- [122] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436-444.
- [123] Sinha A, Lee J, Li S, et al. Lensless computational imaging through deep learning[J]. *Optica*, 2017, 4(9): 1117-1125.
- [124] Hao J Y, Lin X, Lin Y K, et al. Lensless phase retrieval based on deep learning used in holographic data storage[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(17): 4168-4171.
- [125] Kakichashvili S D. Method for phase polarization recording of holograms[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1974, 4(6): 795-798.
- [126] Nikolova L, Todorov T. Volume amplitude holograms in photodichroic materials[J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1977, 24(12): 1179-1192.
- [127] Nikolova L, Todorov T, Stefanova P. Polarization sensibility of the photodichroic holographic recording[J]. *Optics Communications*, 1978, 24(1): 44-46.
- [128] Kuroda K, Matsushashi Y, Fujimura R, et al. Theory of polarization holography[J]. *Optical Review*, 2011, 18(5): 374-382.
- [129] Zang J L, Fan F, Liu Y, et al. Four-channel volume holographic recording with linear polarization holography[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4107-4110.
- [130] Bittner R, Meerholz K, Steckman G, et al. Dark decay of holograms in photorefractive polymers[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(2): 211-213.
- [131] Cheng N, Swedek B, Prasad P N. Thermal fixing of refractive index gratings in a photorefractive polymer[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 71(13): 1828-1830.
- [132] Bittner R, Meerholz K, Steckman G, et al. Dark decay of holograms in photorefractive polymers[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(2): 211-213.
- [133] Gibbons W M, Shannon P J, Sun S T, et al. Surface-mediated alignment of nematic liquid crystals with polarized laser light[J].

- Nature, 1991, 351(6321): 49-50.
- [134] Ramanujam P S. Evanescent polarization holographic recording of sub-200-nm gratings in an azobenzene polyester[J]. Optics Letters, 2003, 28(23): 2375-2377.
- [135] Liu S, Gleeson M R, Guo J X, et al. Modeling the photochemical kinetics induced by holographic exposures in PQ/PMMA photopolymer material[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(11): 2833-2843.
- [136] Yeh J H, Harton A, Wyatt K. Reliability study of holographic optical elements made with DuPont photopolymer[J]. Applied Optics, 1998, 37(26): 6270-6274.
- [137] Trofimova A V, Stankevich A I, Mogil'nyi V V. Phenanthrenequinone-polymethylmethacrylate composite for polarization phase recording[J]. Journal of Applied Spectroscopy, 2009, 76(4): 585-591.
- [138] Lin S H, Cho S L, Chou S F, et al. Volume polarization holographic recording in thick photopolymer for optical memory [J]. Optics Express, 2014, 22(12): 14944-14957.
- [139] Li C, 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.
- [140] Liu Y, Fan F L, Hong Y F, et al. Volume holographic recording in Al nanoparticles dispersed phenanthrenequinone-doped poly(methyl methacrylate) photopolymer[J]. Nanotechnology, 2019, 30(14): 145202.
- [141] Liu Y, Fan F L, Tan X D. SiO₂ NPs-PQ/PMMA photopolymer material doped with a high-concentration photosensitizer for holographic storage[J]. Polymers, 2020, 12(4): 816.
- [142] Liu Y, Fan F L, Hong Y F, et al. Volume holographic recording in irgacure 784-doped PMMA photopolymer[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20654-20662.
- [143] 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.
- [144] Fan F L, Liu Y, Hong Y F, et al. Highly concentrated phenanthrenequinone-doped poly(MMA-co-ACMO) for volume holography[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(11): 110901.
- [145] Tan X D, Lin X, Wu A A, et al. High density collinear holographic data storage system[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2014, 7(4): 443-449.

Advances in Multi-Dimensional Modulated Holographic Data Storage

Tan Xiaodi¹, Lin Xiao¹, Zang Jinliang², Fan Fenglan³, Liu Jinpeng⁴, Ren Yuhong¹,
Hao Jianying^{1*}

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

²National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

³College of Chemistry and Chemical Engineering, Hebei Normal University for Nationalities, Chengde 067000, Hebei, China;

⁴School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China

Abstract

Background The holographic optical storage method stores information in a three-dimensional space of the recording medium, and writes and reads it in parallel with two-dimensional data transmission. Therefore, it features large capacity and high speed that traditional optical discs cannot match. As early as the 1960s, this method was hailed as a high-density and high-speed data storage method. However, due to the lack of good recording materials at that time, it only remained in conceptual research and did not develop well. Throughout the development history of holographic optical storage, every major progress depends on the materials. In the 1990s, people employed the photorefractive effect of crystals to carry out volume holographic data storage, which once became a research hotspot with many ingenious designs being proposed. AT&T, Bell lab, IBM, RCA, and 3M in the USA, Thompson CSF in the UK, NEC and Hitachi production institute in Japan, and California Institute of Technology and Stanford University in the USA have attempted to study holographic optical storage.

After entering the 21st century, companies represented by InPhase and Aprilis in the USA proposed photopolymer as a holographic optical storage material, with a data storage life of up to 50 years. Japan's Optware company has taken a significant step towards the productization of holographic optical storage technology with its unique collinear holographic optical storage method which can effectively avoid interference from environmental vibrations. However, there is still a significant gap between the actual recording density and the theoretical value of holographic optical storage technology. The reason is that there are too few parameters available for modulation in traditional holographic optical storage technologies. Using various parameters of light for multi-dimensional modulation, the recording density of holographic optical storage can be further improved to fully utilize the original capabilities of holographic optical storage. However, how to record and read multi-dimensional modulation information of light is a challenge.

In China, in the 1990s, Beijing University of Technology developed a high-capacity disk holographic data storage system by employing crystal materials as the recording medium, which realized non-volatile storage and a volume storage

density of 10 Gb/cm³. Tsinghua University constructed an orthogonal polarization dual channel access system and a large capacity volume holographic correlation system in 2006 and 2009 respectively.

Since 2012, we have carried out research on holographic data storage at Beijing Institute of Technology, proposed to increase the phase and polarization modulation modes, and adopted multi-dimensional modulation holographic optical storage technology, which can not only improve the storage density but also accelerate the data transmission rate. Additionally, we have also researched the polarized holography theory based on tensor models for polarization modulation, and our achievements take the lead among peers in the world. Based on previous studies, we have researched polarization-sensitive composite holographic recording materials. By introducing new photosensitizers and composite substrate benzyl methacrylate, the polarization response performance of the materials has been improved to some extent, thereby providing a theoretical and technical basis for preparing high-performance multi-dimensional response materials.

Objective At present, our research on utilizing multi-dimensional modulation to improve holographic data storage performance is among the international advanced levels, and these achievements are closely related to the study we conducted during our time at the School of Optics and Photonics at Beijing Institute of Technology. We will introduce our series of research on this technology during this period and would like to provide our paper as a tribute to the 70th anniversary of the establishment of the School of Optics and Photonics at Beijing Institute of Technology.

Prospect Multi-dimensional modulation holographic data storage technology maximizes the ability of holography to store the amplitude, phase, and polarization information of light. While effectively enhancing the recording density of holographic data storage, it can also improve the data transmission speed. However, the influence of reconstruction noise on the density of holographic data storage should be fundamentally overcome to narrow the gap between the actual holographic data storage density and the theoretical value. Further research on multi-dimensional modulation high-density holographic data storage technology is also necessary to develop photopolymer holographic data storage materials with China's independent intellectual property rights, especially polarized holographic materials that can simultaneously record the amplitude, phase, and polarization information of light. We are convinced that with the further study of polarized holographic tensor theory and deep learning application, innovative achievements in multi-dimensional modulation, deep learning fast reading, and composite materials continue to be made. In addition, a new era of multi-dimensional modulation holographic data storage technology research will be ushered in soon. With the further development of industrialization research on holographic data storage technology, our country can seize the commanding heights of optical storage intellectual property rights and standards, and promote the formation of a new optical storage industry oriented to big data archiving and storage.

In addition to holographic data storage technology, glass storage is also one of the deployed long-term cold data storage technology schemes, while DNA data storage is more in the theoretical stage. In terms of traditional technology, if solid-state disks can break through long-term power outage data storage and further reduce data storage costs, they will have broader applications in cold data storage. Traditional Blu-ray discs can make breakthroughs in multi-layer writing, but the process is difficult. If they have a high yield rate, they can still alleviate the data storage pressure in the short term. At present, a data storage model with integrated magneto optoelectronic technology has been built, and more technological upgrading and new technologies will gradually be proposed to jointly solve the storage problem of explosive big data growth.

Key words holographic storage; multi-dimensional modulation; big data storage; storage density