

玻璃多维光存储技术研究进展

吴佳佳¹, 高凯¹, 陈晨端¹, 王志强¹, 邱建荣², 谭德志^{1,3*}¹之江实验室, 浙江 杭州 311121;²浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;³浙江大学材料科学与工程学院, 浙江 杭州 310058

摘要 大数据时代海量数据的产生和积累对存储性能提出了更高的要求,因此实现低能耗、长期安全、高效的数据存储是数字化社会建设的当务之急。聚焦以玻璃作为存储介质的光存储技术,概述了该技术的研发进展和维度复用情况,并对其面临的挑战和机遇进行了展望。同时探讨了光场调控技术与深度学习技术在光存储领域中的潜在应用,以期为该领域的研究者提供相关参考。

关键词 全息; 激光材料加工; 光存储; 玻璃; 多维复用; 光场调控; 深度学习

中图分类号 TN249 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL230693

1 引言

信息存储是人类文明传承的重要手段,是社会经济发展的必要环节。随着大数据时代的到来,各行各业的数据量呈爆炸式增长,人类面临着前所未有的数据洪流。据国际数据公司(IDC)预测,2025年全球数据总量将达到175 ZB,如果全部存储在数字化视频光盘(DVD)中,DVD堆叠高度可绕地球222圈^[1]。如何实现海量数据的长期稳健、绿色节能存储已成为现代社会亟须解决的问题。目前广泛使用的数据存储设备,如磁带、磁盘、固态硬盘等,普遍面临能耗高、寿命短等问题。相比之下,光存储方式虽然读写速度较慢、容量较小,但在成本、能耗、可靠性以及使用寿命等方面具有独特优势,被认为是未来信息存储领域的重要发展方向之一^[2]。以光盘(CD)、DVD、蓝光光盘(BD)为代表的传统光存储技术已经实现产业化,其记录密度也在显著提升,单张蓝光光盘的存储容量可达300 GB。国外(松下、索尼等)和国内(紫晶存储、易华录等)的厂商已拥有大容量的蓝光数据存储系统的产业化生产线,蓝光数据存储已应用于国家超算中心、国家档案馆、遥感卫星、云存储等。因此,采用高频访问数据磁、电存储及大规模温冷数据光存储的方式,构建以电磁光存储为支柱的数据存储体系,对缓解大数据存储压力、保障我国数字化经济安全高效发展具有重要意义^[3]。然而,传统光存储技术的存储密度受衍射极限和存储维度的限制,容量难以大幅度提升。为了进一

步提高单盘存储容量和存储速度,人们不断探索新的技术手段和方法,如全息光存储技术^[4-12]、多维复用光存储技术^[13-18]以及超分辨光存储技术^[19-24]等,多种存储技术的结合和优化有望实现单盘PB级甚至更高级别的存储容量。

玻璃是一种高透明的非晶态固体材料,具有优异的热、光和化学稳定性,是一种理想的光存储介质。以玻璃作为存储介质的光存储,其存储寿命甚至可达上亿年^[25],是温冷数据永久存储以及在战争、灾变等恶劣环境下保存数据的绝佳方式。近几十年来,研究者们不断深入探索基于玻璃的光存储的相关机理和技术手段,并展开了一系列研究,如基于折射率变化的三维光存储、基于周期性纳米结构的多维光存储、基于离子价态变化的多维光存储、基于金属纳米团簇/颗粒的多维光存储、基于量子点/纳米晶的多维光存储等。本文从维度复用的角度出发,对这些方案进行了介绍,包括它们的形成机制和性能参数,并展望了玻璃光存储领域的发展前景,分析了其面临的挑战。

2 玻璃多维光存储

2.1 基于折射率变化的三维光存储

玻璃中折射率变化的研究历史可以追溯到1994年,当时研究者偶然发现飞秒脉冲激光辐照玻璃内部会引起空间选择性折射率变化,并由此提出了三维光存储技术方案^[26]。1996年,Glezer等^[27]利用该折射率变化特性,成功在熔融石英玻璃中实现了10层二进制

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-06-19; 录用日期: 2023-06-27; 网络首发日期: 2023-07-07

基金项目: 科技部重点研发计划(2021YFB2800500)、国家自然科学基金面上科学基金(62275233)、之江实验室揭榜挂帅项目(2022PH0AC01)

通信作者: *wctdz@zju.edu.cn

存储数据点的记录,存储密度极限约为 10^{13} bit/cm³。1998 年, Qiu 等^[28]进一步研究了折射率比特点大小与飞秒脉冲激光参数的关系,为优化存储性能提供了理论指导。2012 年,日本日立公司成功在长度为 2 cm、厚度为 2 mm 的方形石英玻璃中实现了 4 层信息记录,存储密度约为 40 MB/inch² (1 inch=2.54 cm),略高于一张标准 CD 的存储密度,且 2 h、1000 °C 加速耐温实验后数据读取能力并未退化^[29],这也证实了玻璃光存储的稳定性和永久性。

2.2 基于周期性纳米结构的多维光存储

当飞秒激光聚焦在透明玻璃内部时,会在辐照区域产生强烈的非线性效应,导致玻璃的结构和性质发生变化^[30-33]。通过调控激光脉冲能量可以在辐照区域得到不同类型的修饰结构:脉冲能量较低时会出现折射率呈平滑变化的结构 (Type I)^[27-29];脉冲能量较高时会出现微爆炸,导致微孔或裂缝;能量介于两者之间时会出现具有双折射特性的周期性纳米结构 (Type II)^[34-36],这种周期性结构具有可控各向异性和高耐久性,在多维光数据存储和信息加密等领域中有着巨大的应用潜力^[37-39]。

2003 年, Shimotsuma 等^[35]首次通过背散射电子图像观测到飞秒激光在石英玻璃内部诱导的周期性纳米光栅结构,该纳米结构分布在与激光传播方向垂直的焦平面上,其排列方向与入射激光偏振方向垂直。他们认为入射光场与电子等离子体密度波之间的相互干涉导致了玻璃材料中等离子体浓度的周期性调制和永久结构变化。2008 年, Taylor 等^[36]利用纳米等离子体模型进一步阐述了自组织平面纳米光栅结构的演化过程。当超短脉冲聚焦到透明介质上时,缺陷中心的局域非均匀非线性多光子电离产生了随机分布的电离热点,这些热点在几个脉冲后演化为球形的纳米等离子体,其密度决定了后续的演化过程。当电子等离子体密度小于临界密度时,纳米等离子体边界处的场增强导致球形等离子体在垂直于激光偏振方向上不对称生长。当电子等离子体密度接近临界密度时,这种不对称生长进一步加速,形成纳米平面。当激光继续辐照时,纳米平面内的电子等离子体密度会超过临界密度,此时纳米平面会变成准金属,进而影响光的传播,最终形成自组织的周期性纳米光栅。另外,他们还在熔融石英玻璃中演示了这种纳米光栅结构的可擦除重写性。纳米光栅的擦除被认为是激光退火的一种形式,激光脉冲在短时间内加热材料,通过硅的黏性流动缓慢消除旧裂纹,同时重写激光束电场导致新裂纹的产生,新的光栅结构在旧结构消失之前已经形成。因此通过改变激光写入的线偏振方向,生成的新光栅体素覆盖原有光栅体素,进而实现对存储数据的擦除和改写,实验结果表明,在经历 1000 次重写和超过 10^6 个脉冲积累后系统仍可以读出具有较高信噪比的双折射信号,且耐久性良好。

2010 年, Shimotsuma 等^[40]利用慢轴取向和光程延迟作为额外维度复合三维空间,实现了 5D 光存储。他们采用空间光调制器将偏振方向由半波片控制的单束激光调制成 100 个等脉冲能量光束,在石英玻璃中制备了一幅尺寸为 3.4 mm×1.8 mm 的世界地图。存储数据由具有液晶偏振补偿功能的偏振光学显微镜读取,存储密度达 300 Gbit/cm³,是常规的直径为 12 cm 的蓝光光盘的存储容量的 10 倍。2012 年, Beresna 等^[41]利用超快激光同时将麦克斯韦和牛顿记录在一幅图像中,证明了纳米光栅慢轴取向和光程延迟可以被辐照光强和偏振独立调控,实现了 5D 光存储。2014 年, Zhang 等^[25]演示了纳米光栅慢轴取向和光程延迟多级编码的 5D 光存储,将数据记录速度提升了两个数量级。如图 1 所示,该写入装置由包含四段式半波片矩阵和液晶空间光调制器的 4f 系统组成,可以同时记录具有四个慢轴取向和不同延迟水平的多个双折射点,每个双折射点包含 3 bit 信息,并通过定量双折射测量系统读出信息。若在常规 CD 上写入 60 层,可实现 18 GB 的存储容量,同时加速老化实验表明该存储方法可以实现以亿年为单位的超长寿命。

纳米光栅结构对光的散射效应限制了数据存储的层数。因此, Sakakura 等^[42]采用超快激光在石英玻璃内部诱导了一种新型的介于 Type I 和 Type II 之间的改性结构 Type X,它由随机分布的纳米孔(垂直于偏振方向延伸)组成,具有超低的散射损耗,在可见光和近红外范围内的透射率高达 99%,它的形成与脉冲密度和脉冲持续时间密切相关(图 2(c)、(d))。图 2(b)揭示了不同脉冲数(N_p)下纳米结构的演化过程,当 N_p 为 50 时可以观察到随机分布的纳米孔;随着脉冲数的增加($N_p=100\sim 150$),纳米孔的浓度和长宽比不断增加,产生延迟更高的双折射修饰;当 N_p 大于 200 时,低损耗的 Type X 修饰转变为高损耗的 Type II 结构。这种高透过率的 Type X 结构的发现使实现百层、千层大容量 5D 光存储成为可能。在此基础上, Wang 等^[43]利用飞秒激光诱导的 Type X 各向异性纳米孔结构实现了 100 层无误差数据读取的 5D 光存储(图 3),每个体素记录 4 bit 数据,包含 8 级慢轴方位角和 2 级延迟,对应的直径为 127 mm 的光盘的存储容量为 350 GB,1 MHz 重复频率下的数据写入速度达到 8 kB/s。在 10 MHz 高重复频率下,通过减小脉冲数、点间距和层间距,可实现约 400 kB/s 的写入速度和每盘 20 TB 的存储容量,但需要减少高重复频率带来的热积累。

2022 年, Yan 等^[44]报道了一种体材料内部的三维纳米结构制造方法,在聚焦飞秒激光的作用下,可以在石英玻璃内部诱导出宽度低至 40 nm 甚至 20 nm 的单纳米狭缝(SNS)结构,宽度远小于激光聚焦的衍射极限,其形成机制与矢量光场同结构相互作用引起的

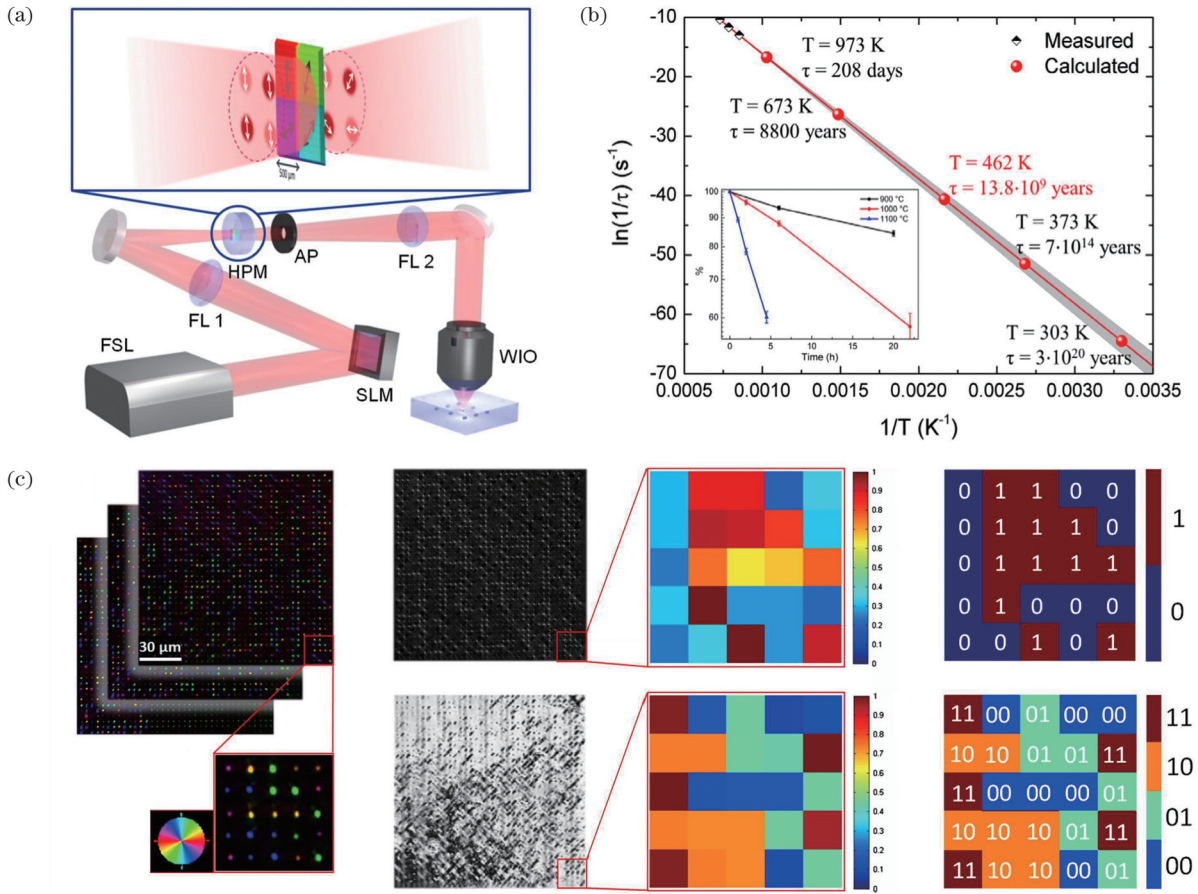


图 1 纳米光栅 5D 光存储^[25]。(a)数据记录装置；(b)纳米光栅衰减速率的阿伦尼乌斯图；(c)数据读出

Fig. 1 5D optical storage of nanogratings^[25]. (a) Data recording setup; (b) Arrhenius plot of nanograting decay rate; (c) data readout

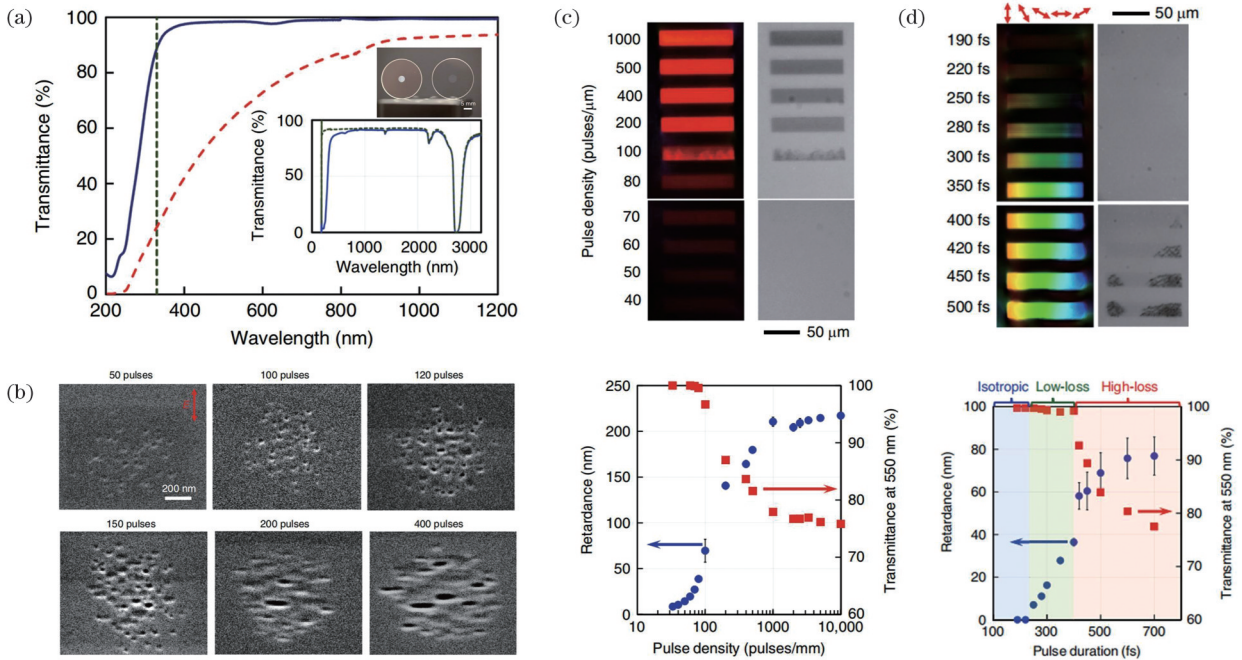


图 2 高透过率的 Type X 结构^[42]。(a) Type II (虚线/左) 和 Type X (实线/右) 双折射结构的透射光谱和光学照片；(b) 不同脉冲数下纳米结构的扫描电镜图像；(c) 不同脉冲密度和 (d) 不同脉冲持续时间下双折射结构的延迟和透射图像

Fig. 2 Type X structures with high transmittance^[42]. (a) Transmission spectra and photographs of birefringent structures of Type II (dotted line/left) and Type X (solid line/right); (b) scanning electron microscope (SEM) images of nanostructures under different pulse numbers; retardance and transmission images of birefringence structure under different (c) pulse densities and (d) pulse durations

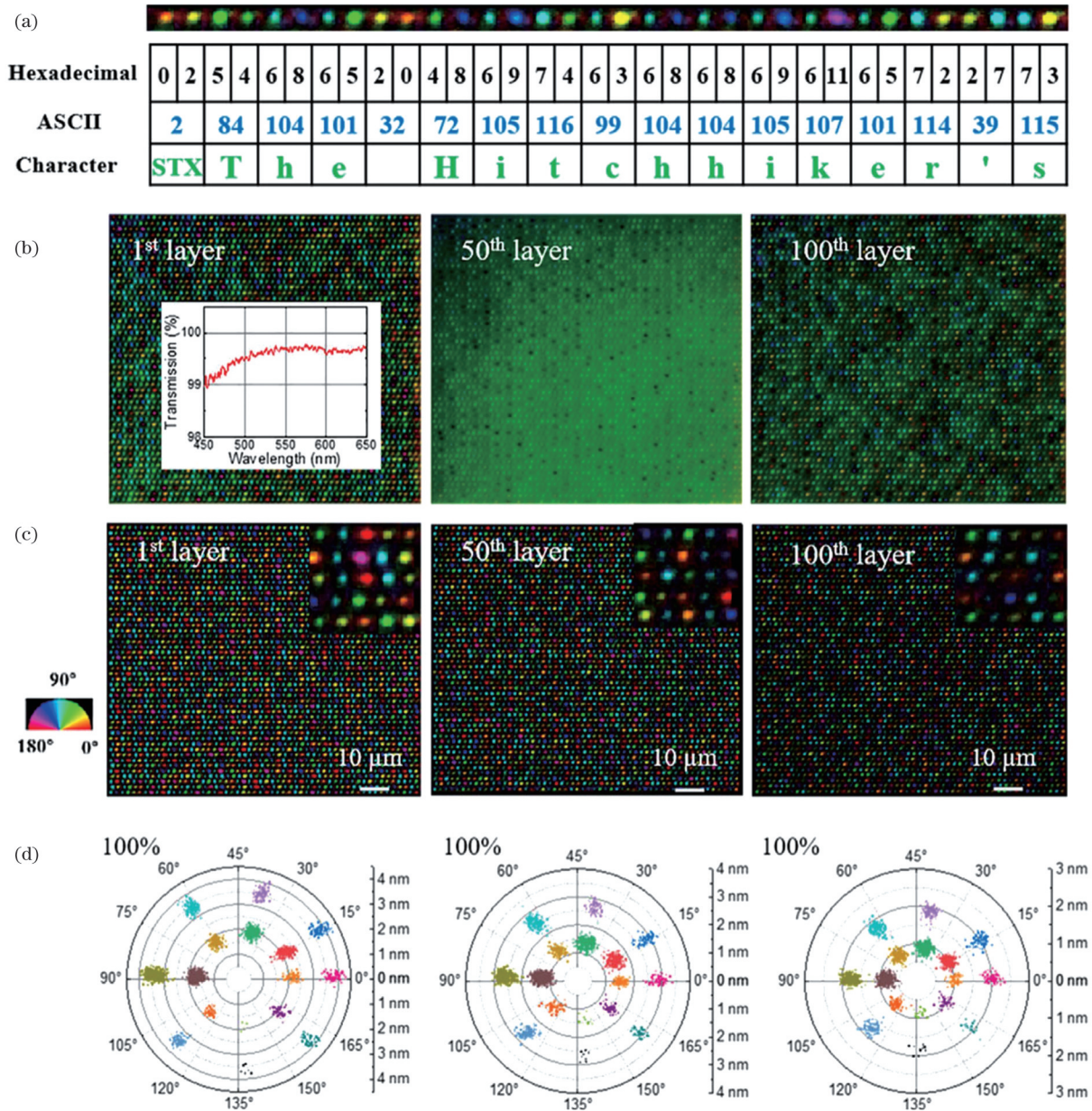


图3 100层无误差的5D光存储^[43]。(a)数据编码和解码说明;(b)不同层数据体素的双折射图像;(c)图3(b)去除背景后的双折射图像;(d)图3(c)中所有体素延迟和方位角的极坐标图

Fig. 3 100-layer error-free 5D optical data storage^[43]. (a) Illustration of data encoding and decoding; (b) birefringent images of data voxels on different layers; (c) birefringent images after removing background of Fig. 3(b); (d) polar diagrams of measured retardance and azimuth for all voxels in Fig. 3(c)

近场增强效应相关。利用SNS的双折射特性可实现超高密度的5D光存储,如图4(b)所示,数据被记录在四个独立层中,其中每个SNS体素包含4 bit信息,点间距为 $1\ \mu\text{m}$,层间距为 $5\ \mu\text{m}$,如果将这些参数应用到标准蓝光光盘尺寸的玻璃中,那么存储容量将达到1.4 TB。另外,还可实现横向间距低至200 nm的5D光存储,每个光盘的等效容量为7.2 TB。为进一步提高数据存储吞吐量,Lei等^[45]同样利用近场增强效应,通过脉冲能量调制,以MHz重复频率快速高效地在玻璃中写入各向异性纳米结构(Type S),当脉冲能量高于微爆炸阈值时,会产生一个各向同性的纳米孔洞

(直径 $\leq 130\ \text{nm}$),随后利用低能量脉冲的近场增强效应将其拉伸为各向异性的纳米层状结构(长度 $\leq 460\ \text{nm}$),从而最大限度地削弱MHz飞秒脉冲产生的热效应(图5)。利用该方法可以在40 MHz的高重复频率下实现MB/s的记录速度,单盘潜在的数据存储容量为500 TB。

Yan等^[46]还利用延迟线和空间光调制器组合或双折射晶体实现了皮秒脉冲的时空操纵,在熔融石英内部产生了各向异性的倾斜纳米结构。其形成机理如图6(a)所示,第一束脉冲诱导产生了自陷激子,并在纳秒时间尺度上产生了正折射率变化,第二束脉冲

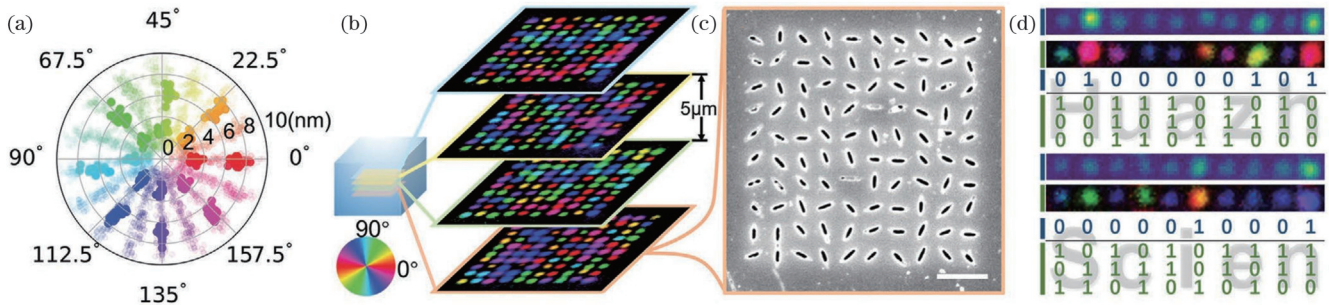


图 4 基于 SNS 结构的高密度 5D 光存储^[44]。(a) 双折射分布图; (b) 慢轴取向分布图; (c) 扫描电镜图; (d) 解码过程示意图
Fig. 4 High-density 5D optical storage based on SNS structure^[44]. (a) Birefringent distribution; (b) slow axis orientation distribution; (c) SEM image; (d) schematic of decoding process

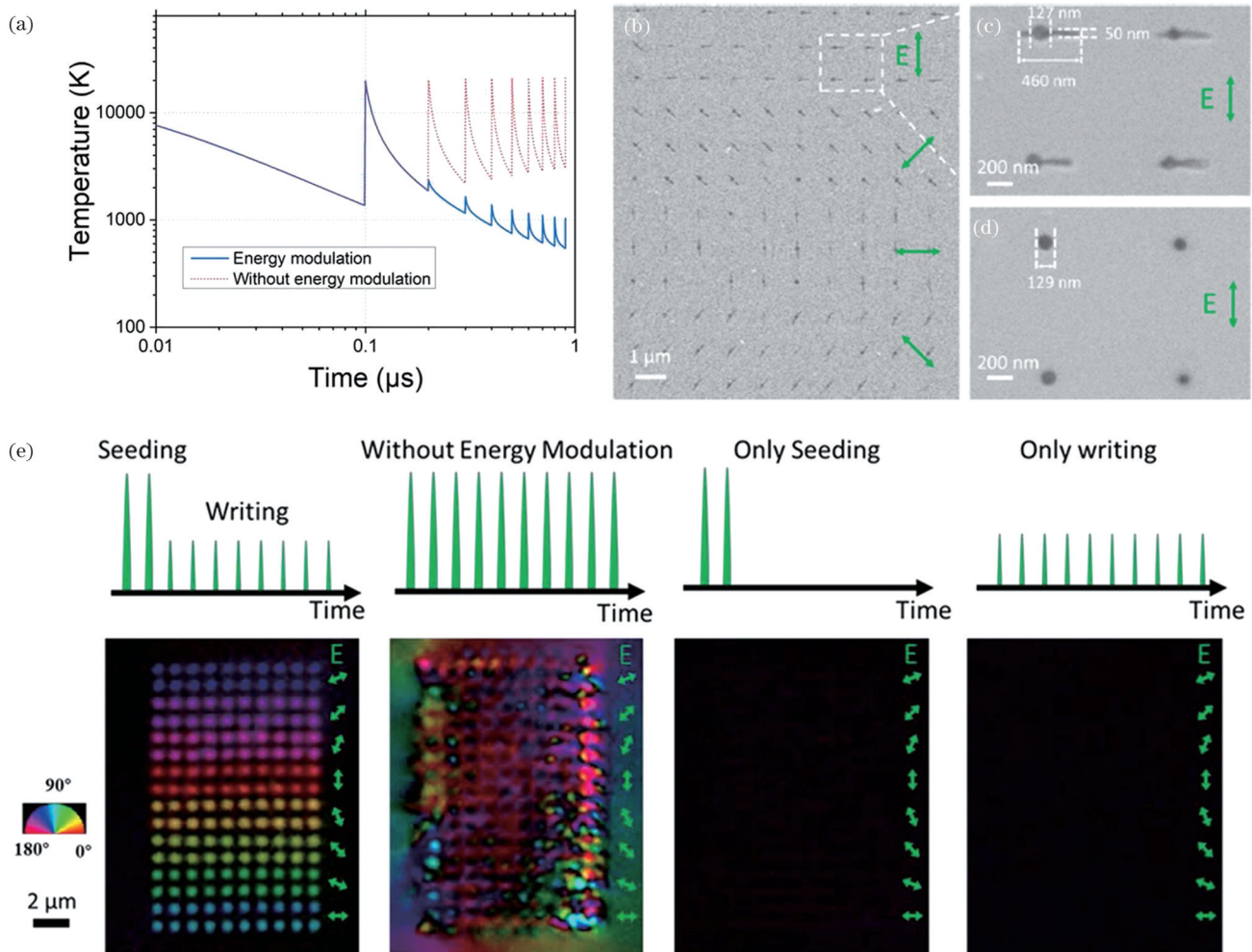


图 5 基于 Type S 结构的高密度 5D 光存储^[45]。(a) 焦点中心温度随时间的演变模拟; (b)~(d) SEM 图像; (e) 脉冲能量调制对比
Fig. 5 High-density 5D optical storage based on Type S structure^[45]. (a) Simulated temperature versus time at focus center; (b)~(d) SEM images; (e) pulse energy modulation comparison

主要在预修饰的重叠区域被吸收,并推测随后的热力学过程主导了最终形态的演化。他们基于该技术在玻璃内部演示了高速的体素数据记录(图 6(b))。通过操控光束的时空特性,可以得到任意三维取向的倾斜纳米结构,这使得实现三维空间、慢轴方位角、光程延迟和倾斜结构极角复用的 6D 光存储技术成为可能。

超快激光直写不仅能在透明材料中产生各种不同

形态的纳米结构,还能诱导晶体向非晶态的相变,反之亦然,已被用于制备三维非线性光子晶体和钙钛矿量子点^[38,47-50]。例如,Zhang 等^[51]采用激光预辐照的方式在 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Ta}_2\text{O}_5\text{-Nb}_2\text{O}_5$ (LTN) 玻璃体系中快速生成晶体型纳米光栅,其可擦除性和可重写性在光学信息加密和数据存储方面有着潜在的应用价值(图 7)。在此基础上,Zhang 等^[52]还提出了一种全无机自组织相变光刻技术,利用超快激光诱导在 LTN 玻璃内部产生了

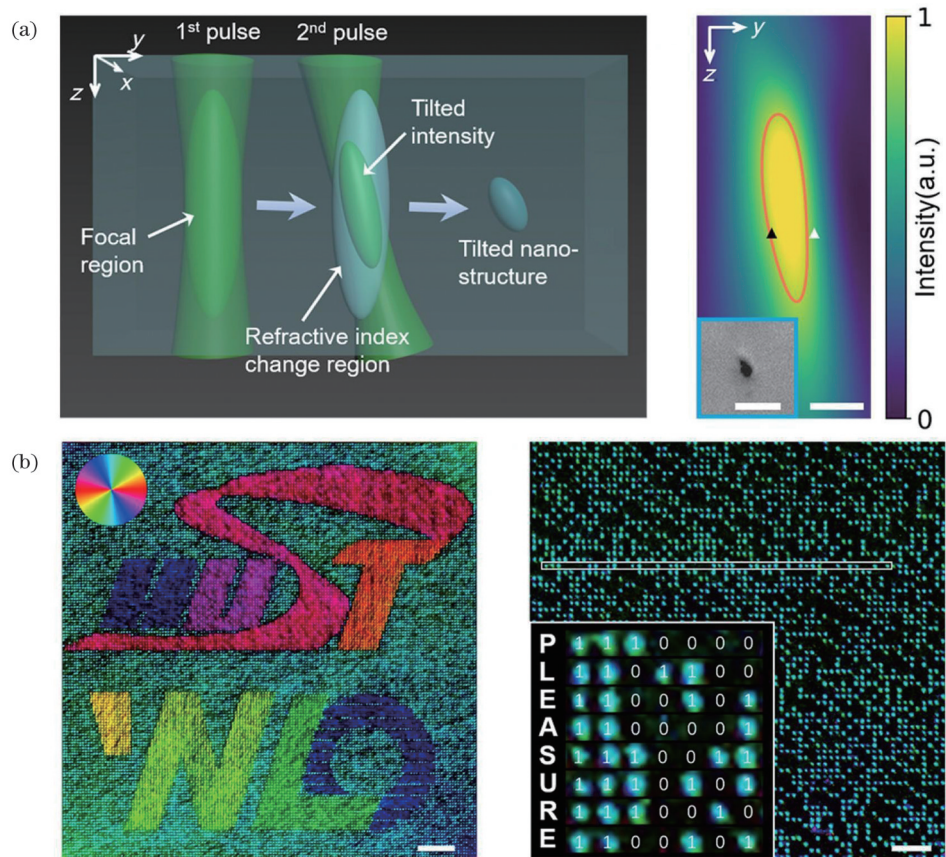


图 6 基于倾斜纳米结构的多维光存储^[46]。(a)倾斜纳米结构形成机理示意图;(b)记录数据慢轴取向图

Fig. 6 Multi-dimensional optical storage based on tilted nanostructures^[46]. (a) Schematic of formation mechanism of tilted nanostructure; (b) slow-axis orientation images of recorded data

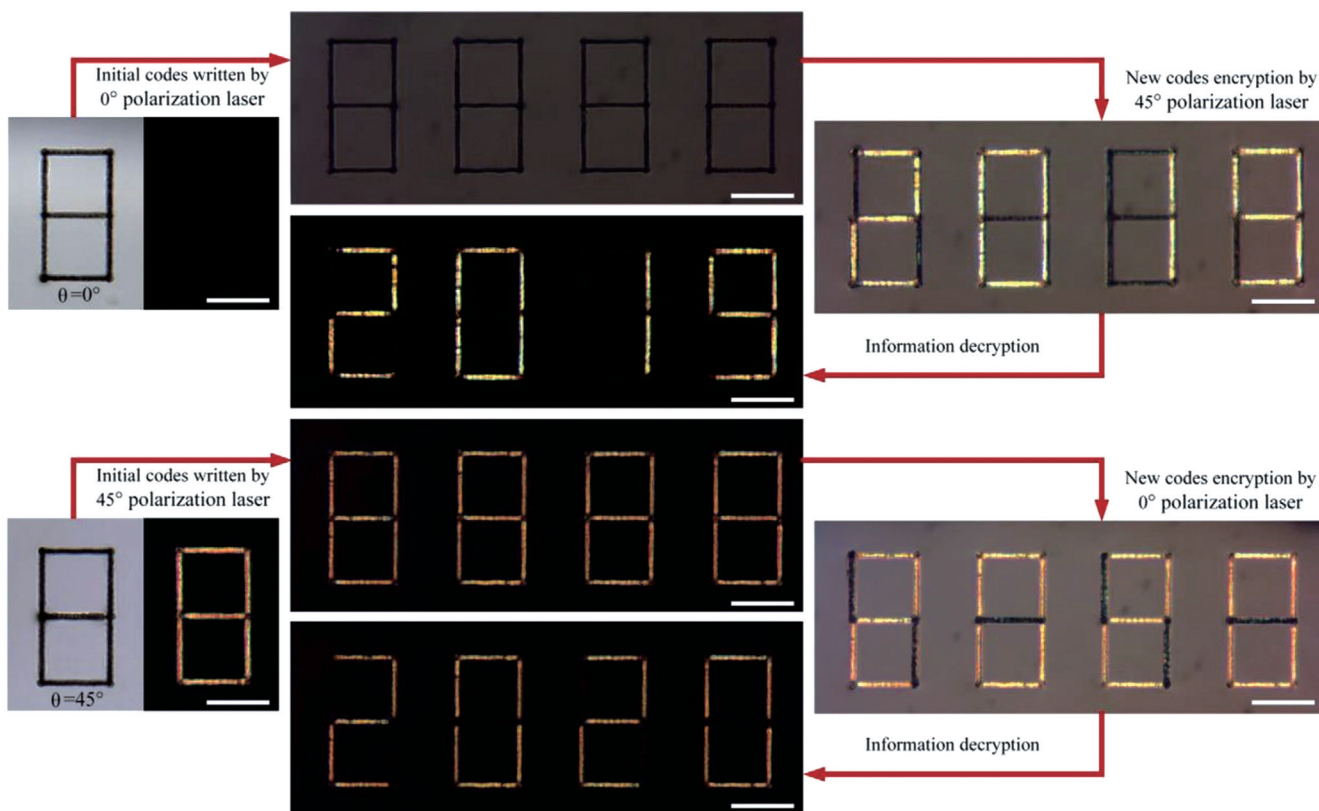


图 7 基于晶体型纳米光栅的光存储与信息加密^[51]

Fig. 7 Optical storage and information encryption based on crystalline nanogratings^[51]

方向依赖的、高度规则的晶体型纳米光栅,为多维光存储提供了新的参考维度。

2.3 基于离子价态变化的多维光存储

利用激光空间选择性调控透明基质中活性离子的局部结构和价态,也可以实现多维光存储。与诱导折射率变化和周期性结构的光存储相比,这种方法可实现独特的发光特性,数据读取信噪比更高^[53-55]。2002年, Miura 等^[56]利用飞秒脉冲激光的空间选择性诱导了硼铝酸钠玻璃中 Sm^{3+} 离子的还原,基于 Sm 离子价态转换实现了数据存储、读取和擦除,存储密度达 10 Tbit/cm^3 ,为可擦重写的发光光存储提供了新思路。2018年, Zheng 等^[57]采用 π 相位阶跃调制的飞秒激光脉冲转换技术提高了 Sm^{3+} 到 Sm^{2+} 的光还原效率,激光峰值强度大幅度降低。

为进一步提高数据存储速度, Wang 等^[53]利用单脉冲诱导硼铝酸钠玻璃中 Sm^{3+} 的还原,实现了单点光致发光直径为 800 nm 的高信噪比 3D 光存储。为进一

步提高光致发光数据的读取精度, Wang 等^[54]采用紫外光预辐照方式抑制玻璃基质中书写点周围 Eu^{2+} 离子发出的背景信号,将 Eu^{3+} 离子掺杂硼铝酸钠玻璃的数据读取的信噪比提高了 10 倍,加速老化实验结果表明,所存储数据的稳定性在室温下可以保持 115 年以上,存储容量约为 270 Gbit/cm^3 。最近, Wang 等^[55]利用单个超快激光脉冲诱导掺铈钙硅铝酸盐玻璃中 Eu^{3+} 离子的还原,实现了超长寿命的 4D 光存储,存储寿命长达 2×10^7 年,写入的局部记录点可以承受 970 K 高温和功率密度为 100 kW/cm^2 的强紫外光辐照(图 8(a)、(b))。此外,他们还观察到活性 Eu^{2+} 离子的宽带发射,其半峰全宽达到了 190 nm ,且光致发光在整个可见光区域内可灵活调控。利用脉冲数调控光致发光强度,单点可记录 4 bit 数据,记录点尺寸减小至 600 nm ,可以实现约 1.4 Tbit/cm^3 的存储密度。另外,他们在玻璃中演示了二进制编码和复杂图案的信息读写(图 8(d))。这些工作为实现超低能耗、超高寿命、

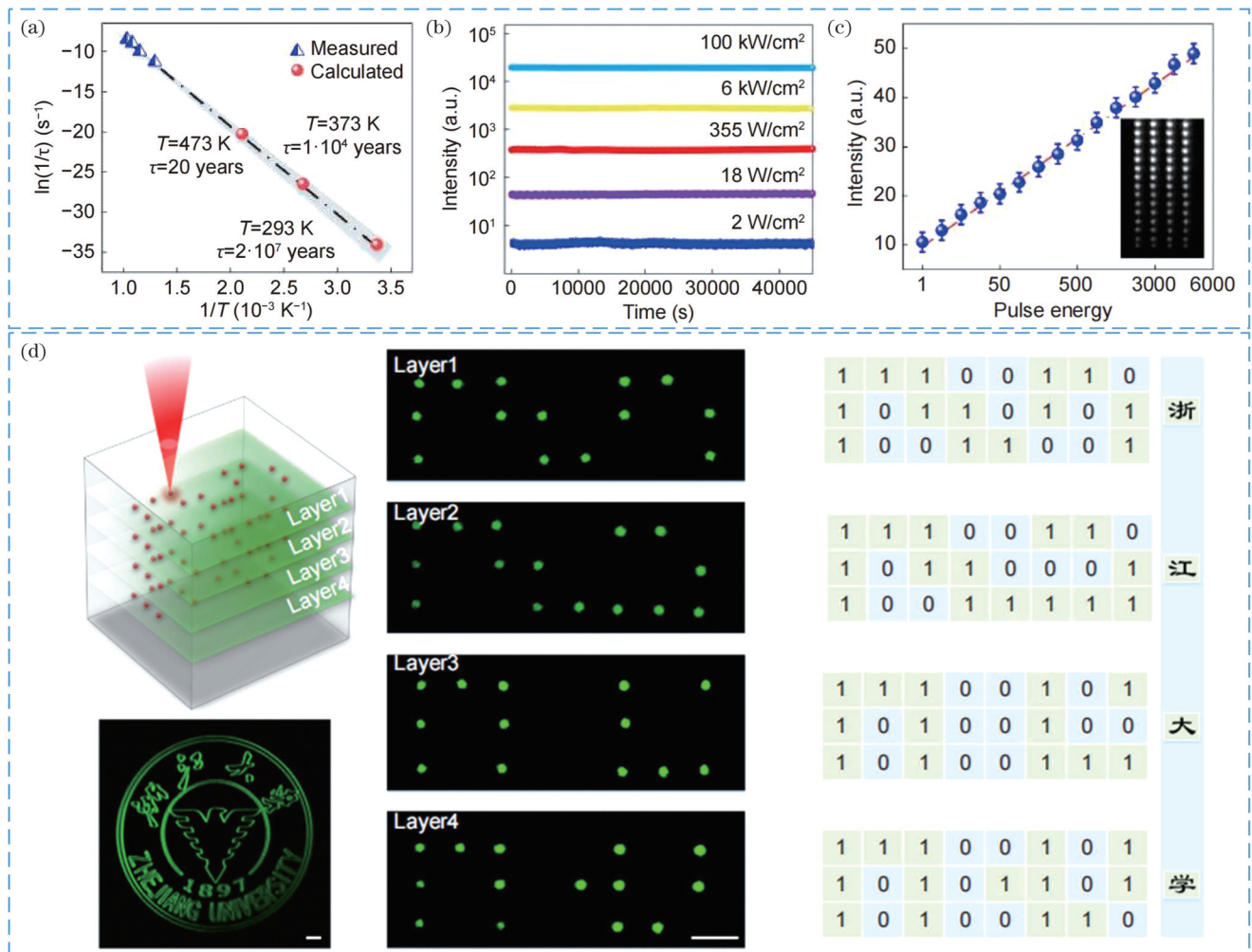


图 8 单脉冲超长寿命的 4D 光存储^[55]。(a) 衰减速率的阿伦尼乌斯图; (b) 记录点在不同激发功率密度下的光致发光稳定性; (c) 16 级光致发光强度编码(右); (d) 光学信息的写入和读出

Fig. 8 Ultra-long lifetime 4D optical storage based on single pulse^[55]. (a) Arrhenius plot of decay rate; (b) photoluminescence stability of written dots under different excitation power densities; (c) 16 levels of photoluminescence intensity coding; (d) optical information writing and readout

超快写入的高密度光存储提供了技术方案。

具有吸收和光致发光调制特性的光致变色材料是近年来发展起来的一种新型光学数据存储介质^[58-63],在光的刺激下材料颜色会发生可逆变化。2021年,Hu等^[64]利用半导体蓝色激光辐照和热刺激操纵稀土离子($\text{Eu}^{3+}/\text{Dy}^{3+}$)掺杂钨磷酸盐玻璃中钨离子的价态变化,

实现了可逆的发光调制,并演示了其在光存储中的应用(图9)。他们采用473 nm激光辐照记录2D/3D图案和信息,利用透过率或发光强度变化读取二进制数据,通过热刺激消除写入数据。其可擦除、可重写和化学稳定性在三维光学数据存储和信息加密等领域中具有潜在的应用价值。

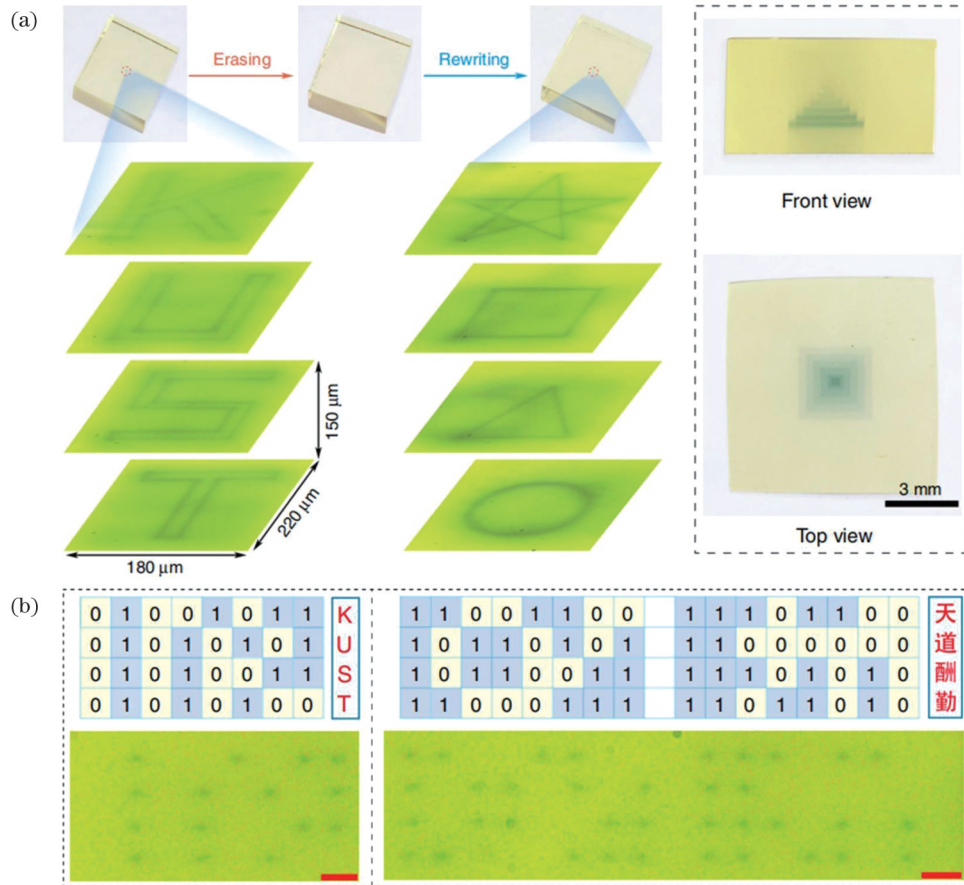


图9 可逆的3D光存储^[64]。(a) 3D光学信息擦除和重写;(b)光学信息读出

Fig. 9 Reversible 3D optical storage^[64]. (a) 3D optical information erasing and rewriting; (b) optical information readout

2.4 基于金属纳米团簇/颗粒的多维光存储

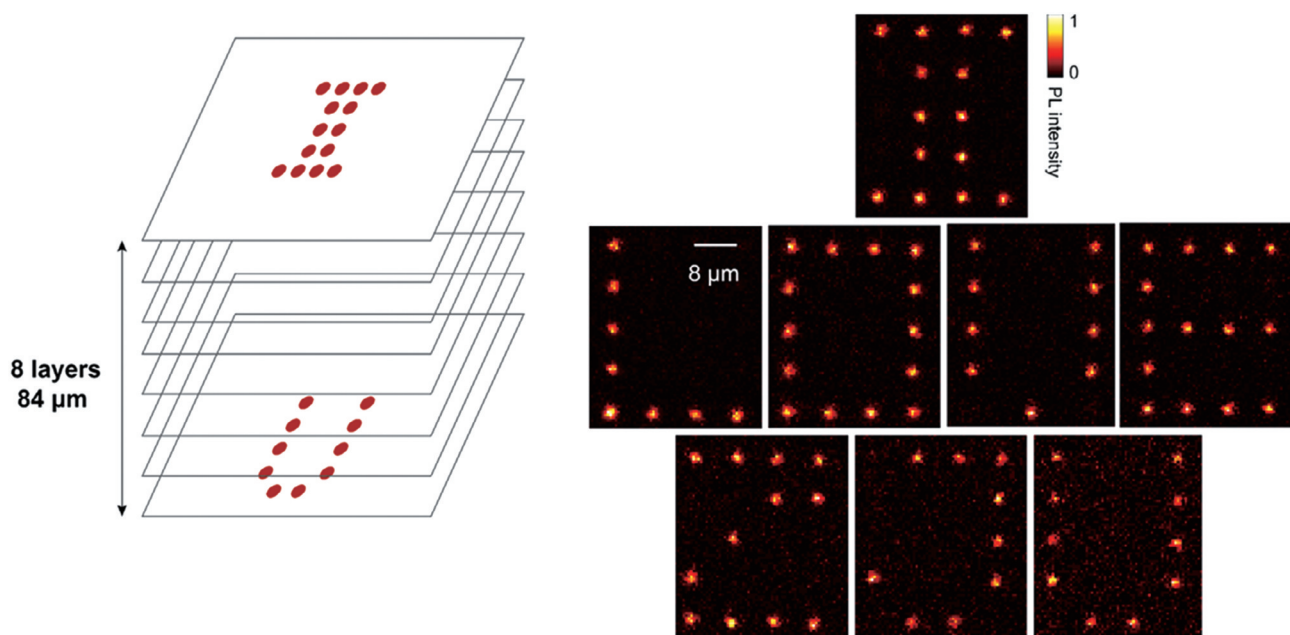
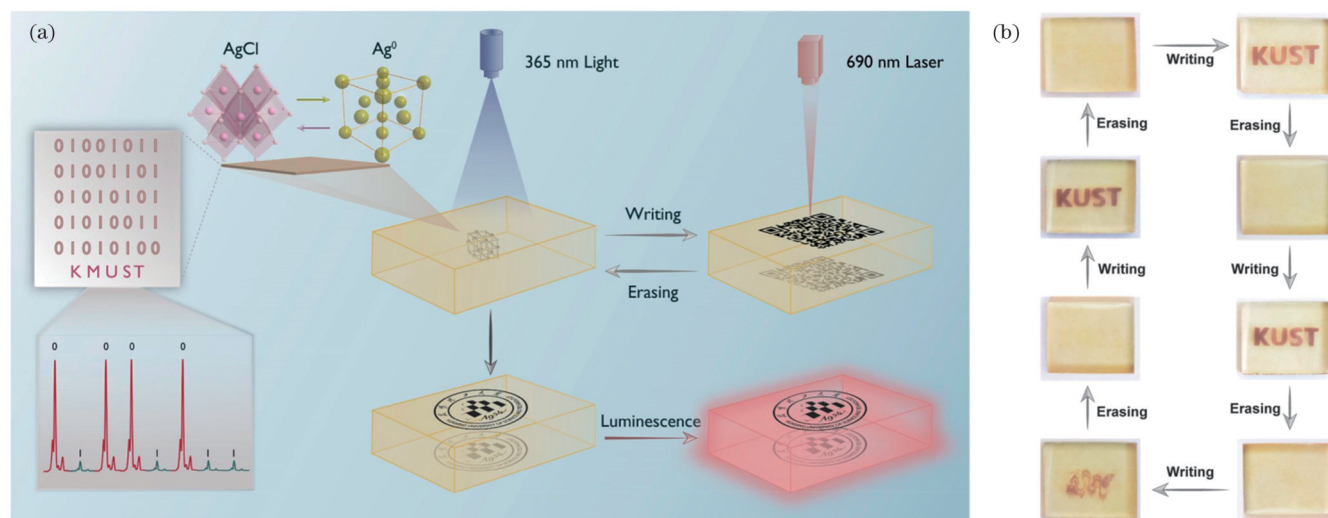
利用飞秒激光在透明材料内部诱导形成贵金属纳米团簇/颗粒已被证明是一种有效的光存储手段^[65-68]。2021年,Tan等^[69]在没有热激活的条件下,利用单脉冲飞秒激光的空间选择性诱导了掺银硅铝酸盐/磷酸盐玻璃中银团簇的形成,通过调节激光参数与银离子掺杂浓度精确控制了银团簇的发光强度和发光直径,实现了大容量、高信噪比的超快3D光存储(图10)。

具有光致变色和发光特性的透明玻璃通常采用热刺激的方式进行漂白,这限制了它的实际应用。因此,Zhao等^[70]制备了一种掺杂稀土离子($\text{Eu}^{3+}/\text{Dy}^{3+}$)和氯化银的锗硼酸盐玻璃,通过全光刺激的方式诱导可逆的光致变色过程,实现了高着色和高发光对比度的3D光存储。锗硼酸盐玻璃具有较低的刚性和较高的缺陷容忍度,有利于氯化银纳米晶的析出,在

365 nm激光和690 nm激光交替刺激下,银纳米颗粒在玻璃中会发生沉淀或分解,实现由透明到黑色的可逆光致变色,其透过率对比度达91%,着色对比度达93%,具有较高的可擦除重写性(图11)。通过调节光致变色稀土银玻璃的透过率和发光率,可实现光学信息的读取,展示了稀土离子和氯化银掺杂的光致变色玻璃在信息存储和加密领域中的巨大应用潜力。

2.5 基于量子点/纳米晶的多维光存储

全无机卤化物钙钛矿量子点/纳米晶因其丰富的物理和光电性质,如可调带隙、较高的载流子迁移率和光发射效率等,在各种光电器件(太阳能电池、光电探测器、发光二极管和激光器等)中具有广阔的应用前景。钙钛矿量子点和半导体纳米晶表面积比大、熔化温度低,因此稳定性较差,对光和热等多种环境刺激高度敏感。将钙钛矿量子点/纳米晶与无机玻璃结合

图 10 基于单脉冲的超快 3D 光存储^[69]Fig. 10 Ultrafast 3D optical storage based on single pulse^[69]图 11 全光刺激的 reversible 3D 光存储^[70]。(a) 光信息写入、读出和擦除示意图；(b) 重复擦写实验Fig. 11 Reversible 3D optical storage with entire photostimulation^[70]. (a) Schematic of writing, reading, and erasing of optical information; (b) repeated erasure experiment

起来,可以提高其化学和热稳定性,玻璃基质的惰性和致密结构可以有效将其与周围隔绝开。因此,将功能性的量子点(QDs)或纳米晶(NCs)嵌入到玻璃介质中,可实现其独特发光、非线性光学等特性与玻璃基质的高度集成,在发光和光存储相关领域具有巨大的应用潜力^[71-78]。

2004年, Qiu等^[79]通过飞秒激光辐照和热处理相结合的方式,在玻璃内部实现了金纳米颗粒的选择性析出,并展望了该方法在数据存储领域中的应用。2020年, Huang等^[73]利用钙钛矿固有的离子特性和低形成能,利用同样的方法,实现了基于CsPbBr₃发光量子点的3D图案的写入、擦除和重复

写入(图12),促进了CsPbBr₃量子点光子器件在高容量光数据存储和信息加密领域中的应用。然而这种方法需要后续高温热处理,这限制了其广泛应用。

超快激光与物质相互作用时产生的热效应小,这通常被认为是超快激光微纳加工和制造的最重要特点之一,也使得它被视为一种冷加工过程。极短的激光脉宽能在激光聚焦微区产生极高的峰值功率,在低重复频率下,其热积累效应可以忽略不计,从而最大限度地减小了加工过程中的热附带损伤和热影响区域,实现材料的微精细加工。然而,2021年, Tan等^[80]提出超快激光与物质相互作用的热效应及其调控可

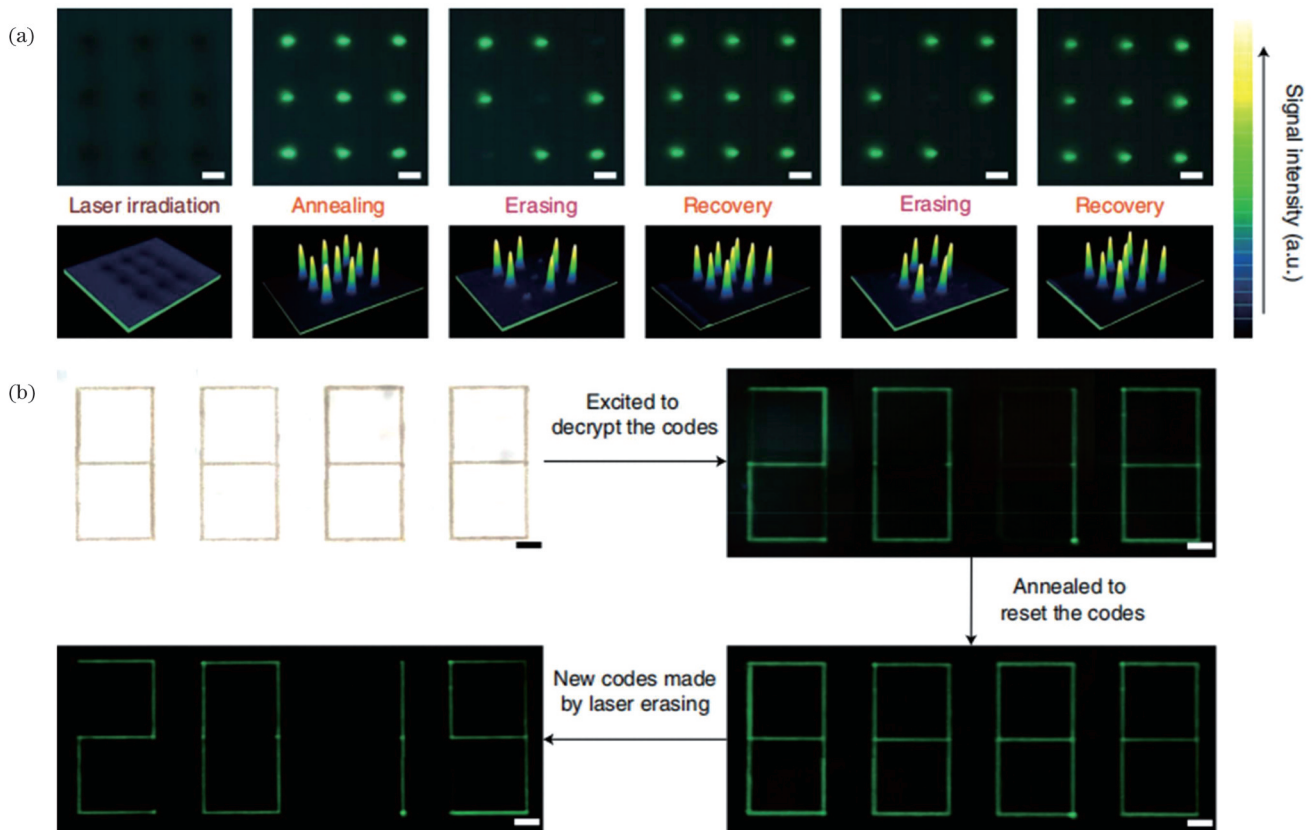


图 12 基于 CsPbBr₃ 量子点的光存储和信息加密^[73]。(a) 紫外(UV)光下 CsPbBr₃ QD 阵列擦除-恢复过程中的光学图像(上)和读出信号强度映射图像(下);(b) 激光辐射构造的加密密钥

Fig. 12 Optical storage and information encryption based on CsPbBr₃ quantum dots^[73]. (a) Optical images (upper) and readout signal intensity mapping images (lower) of CsPbBr₃ QD array during erasing-recovery process under ultraviolet (UV) light; (b) encryption key constructed by laser irradiation

以赋予超快激光加工全新的可能,并提出热效应精密可控的超快激光微纳制造理念。局部热积累效应对诱导透明固体中的各种现象和结构以及提高所制备器件的性能非常重要。例如,热效应可以提高波导截面的对称性,减少传输损耗,提高制造效率;温度分布可以作为热熔区域元素重新分布或结构重组的驱动力,诱导材料内部发生元素再分配和局部结晶;在某些玻璃体系中,对于周期性纳米光栅的形成,热积累效应被认为起到关键的作用。而能量沉积、吸收和扩散及其引起的温度分布和器件性能高度依赖于激光辐照参数(重复频率、脉冲数、扫描速度、平均功率、波长、脉冲持续时间、数值孔径、材料特性和聚焦深度等),因此通过调节这些参数可以实现局部热效应的精密调控。

基于此, Sun 等^[74]通过调控超快激光在玻璃内部诱导的热效应,成功在玻璃中三维直写了稳定的 CsPbI₃ 量子点,无需任何后续热处理工程,一步即可完成,该量子点处出现了峰值约为 670 nm 的强深红色光致发光(PL),量子效率为 23%。通过控制超快激光直写的热积累, CsPbI₃ 量子点可以在不经过热处理的情况下被擦除和重写,且光致发光强度几乎

一致。这种无需热处理的重复写入技术在高密度光存储方面具有重要的应用价值。然而,之前的研究都未能实现玻璃微区发光波长的调控,多波段可调谐显微发光对提高数据存储容量、开发全新发光器件(比如微型发光二极管、高清显示器)等具有重要意义。Sun 等^[75]进一步提出了激光诱导热效应与离子迁移协同调控新策略,实现了对玻璃局部化学特性的精细设计和操控。以含铯、铅、卤化物(Cl⁻/Br⁻/I⁻)离子的硼酸盐玻璃为介质,利用超快激光脉冲产生的强热积累效应,将局部压力和温度增加到玻璃液态相以上,诱导局部纳米相分离,通过调整超快激光的辐照时间,控制液态纳米相分离的动力学过程,实现玻璃内部组分可调的钙钛矿纳米晶的三维直接光刻。如图 13 所示,利用 Br⁻ 和 I⁻ 离子掺杂玻璃的钙钛矿纳米晶(PNCs)发射可实现从绿色到红色的调控,他们还成功设计了 Cl⁻、Br⁻ 和 I⁻ 离子共掺玻璃中 PNCs 的组分和带隙,实现了基于 PNCs 的全彩打印。生成的 PNCs 在紫外线照射、有机溶液和高温(~250 °C)下表现出卓越的稳定性,其平均尺寸为 1~4 nm。该项工作揭示了玻璃结构调控新机制,首次实现了对玻璃微区发光的宽波段(480~

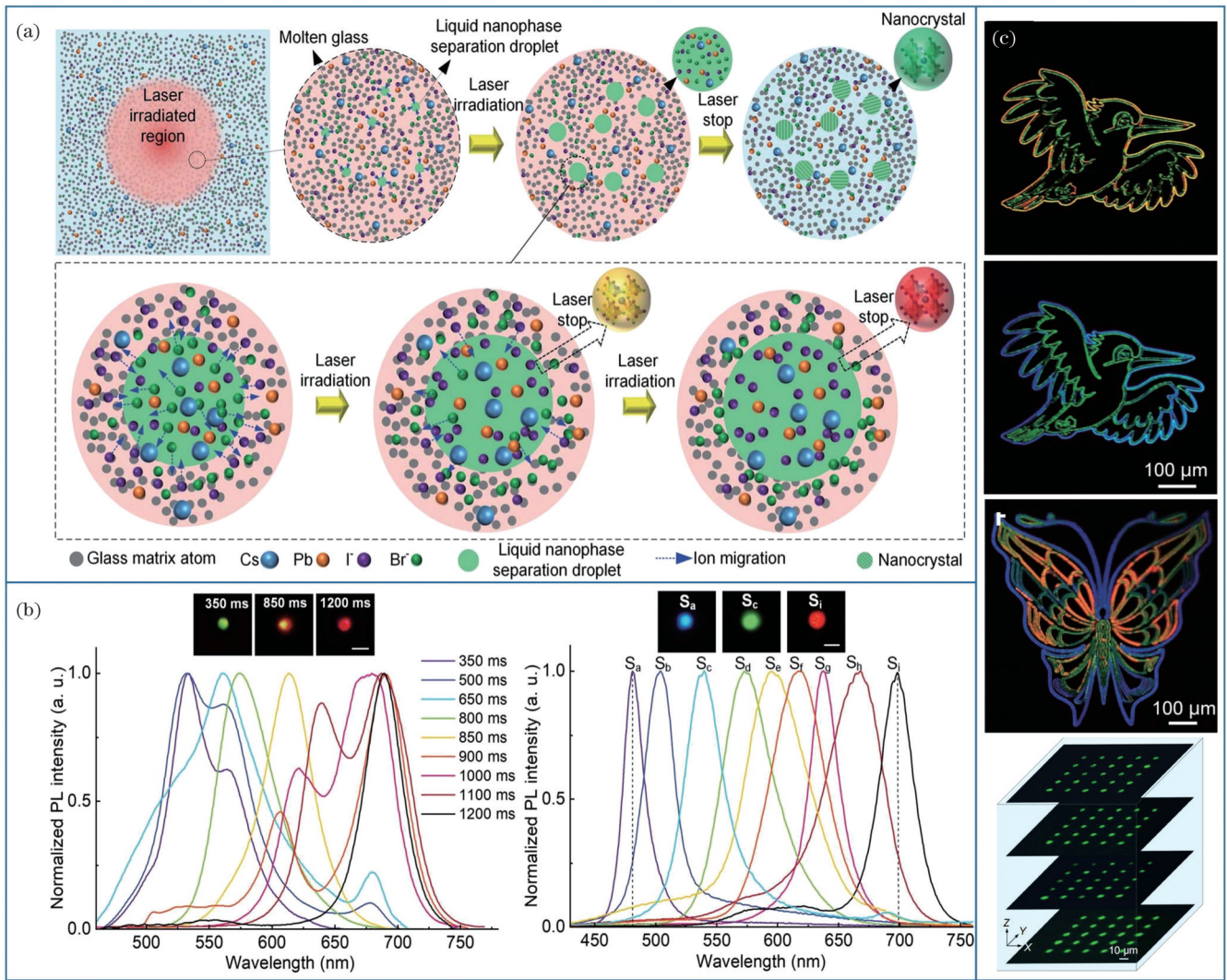


图 13 玻璃中组分可调 PNCs 的 3D 直接光刻^[75]。(a) 超快激光诱导液相纳米分离与 PNC 形成原理图；(b) PNCs 的 PL 图像和 PL 光谱；(c) 多色图案 PL 图像和多层光存储应用

Fig. 13 3D direct lithography of composition-tunable PNCs in glass^[75]. (a) Schematic of ultrafast laser-induced liquid nanophase separation and PNC formation; (b) PL images and PL spectra of PNCs; (c) PL images of multicolor patterns and multi-layer optical storage application

700 nm) 调控, 为三维空间与波长复用的高密度多维光存储提供了新的技术方案, 为光功能玻璃结构的调控与应用开辟了全新的领域。

作为一种经典的光数据存储介质, 具有余辉发光的光激励(PSL)材料因其良好的可擦写性能和写入速度引起了研究者的兴趣^[58-60]。2020年, Lin等^[59]通过热驱动诱导高透明玻璃陶瓷中光激励 $\text{LiGa}_5\text{O}_8:\text{Mn}^{2+}$ 纳米晶的形成, 以光子俘获或释放模式实现了逐位的光学数据写入和读出。如图 14(a) 所示, 随着热处理时间的增加, 绿色发射分量由于红色分量的补偿而得到增强, 实现了红色到绿色的可调发光波长。另外, 研究者还演示了光存储中的应用(图 14(b)), 通过改变热处理时间和 245 nm 紫外光写入功率, 分别实现了波长和发光强度的信息复用, 理论存储密度可达 $130 \text{ Tbit}/\text{cm}^3$, 该方法在高密度多维光存储方面具有潜

在的应用价值。

3 玻璃光存储的挑战和机遇

综上所述, 当前玻璃光存储技术正朝着超高密度、多维复用、超快读写、可擦重写、超长寿命等方向发展。从实际应用层面来看, 玻璃光存储在读写速度、读写精度、存储密度、存储容量等方面还面临着一些挑战。近年来, 人工智能和深度学习技术发展迅速, 在计算机视觉、自然语言处理、语音识别等领域中取得了显著的成果和突破。如卷积神经网络、循环神经网络、生成对抗网络以及 Transformer 等模型在图像分类、目标检测、语义分割、机器翻译、文本生成等任务中展现出卓越的性能。深度学习作为一种基于人工神经网络的机器学习方法, 其核心思想是利用多层的网络结构从数据中学习抽象的语义信息, 通过不



图 14 基于 $\text{LiGa}_5\text{O}_8:\text{Mn}^{2+}$ 纳米晶的 5D 光存储^[59]。(a) 玻璃结晶后 Mn^{2+} 位点变化引起多色发射；(b) 3D 空间/波长/强度复用的光存储演示实验

Fig. 14 5D optical storage based on $\text{LiGa}_5\text{O}_8:\text{Mn}^{2+}$ nanocrystals^[59]. (a) Site variation of Mn^{2+} after glass crystallization induces multicolour emission; (b) demonstration experiment for optical storage with 3D space/wavelength/intensity multiplexing

同层次的特征提取和转换,将原始数据映射到更高维的特征空间中,并通过训练的方式从大量数据中自动学习抽象和复杂的特征表示以及内在规律,从而实现数据的分类、回归、优化等。深度学习作为一种数据驱动算法,其强大的数据表征、模型构建与泛化推理能力,为光学等其他领域也提供了新的思路 and 手段,如数字全息、超分辨成像、逆向微纳结构设计和激光微纳制造等^[81]。深度学习可以通过神经网络来模拟或近似处理复杂的光学系统或过程,避免了高成本的数值模拟或物理实验,提高了计算效率和计算精度;可以通过结合光学系统的物理模型,如麦克斯韦方程、波动方程等,约束神经网络的结构和参数,提高模型的准确性和泛化能力;还可以用于设计满足物理约束的光学器件,从光学数据中反演物理参数,从物理模型中生成光学数据等。因此,光存储与新兴深度学习技术的结合对实现精确读写的超快光存储具有重要的意义^[82]。

数据最大存储速度与单点记录所需的脉冲数呈负相关,脉冲数越小,写入速度越快。而目前大部分玻璃光存储都需要多个脉冲,同时逐点的数据记录和采集方式也难以满足实际应用需求。基于光场调控

技术的多焦点并行加工和读取是实现高通量光存储的一种有效手段(图 15(a)),结合计算全息图和光场调控器件,如液晶空间光调制器和数字微镜等,通过改变入射激光相位分布,可实现二维/三维焦场动态调控^[20, 83-85]。目前该方法主要受限于调控器件的刷新速度、损伤阈值以及全息图的计算速度和调制精度。利用深度学习技术能够在保证目标光场再现精度的前提下,大幅度提高全息图的计算速度^[86-88]。而全息的计算精度和适用性在很大程度上受训练数据集、网络结构和损失函数等影响。因此,设计单脉冲低阈值玻璃基材、构建高精度全息图计算网络以及引入高阈值高刷新调控器件对于提高数据吞吐量至关重要。

数据存储密度与存储单元的点间距、层间距以及单点记录比特数密切相关。利用多维复用技术可以有效提高存储单元的比特数,同时需要尽可能减小存储单元的空间尺寸。然而,光学系统和折射率不匹配会引入像差^[89],使聚焦在样品内部的光斑发生畸变,降低读写能量利用率和读出系统的光学分辨率,增加存储单元体积,严重制约了数据存储性能的提升。利用合理的像差校正手段^[90-95]进行相位补偿,能够在一定程

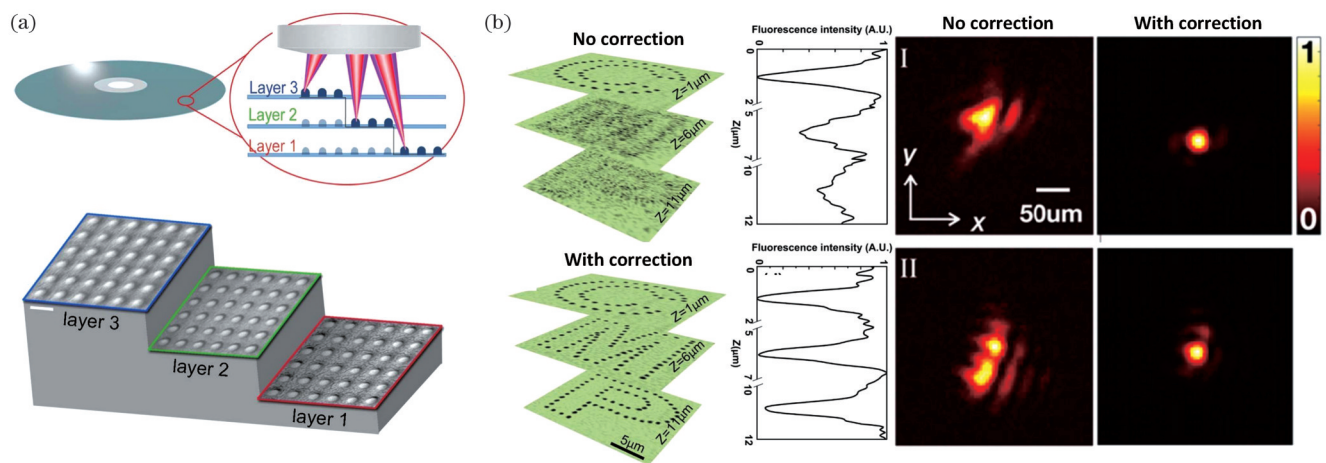


图 15 光存储的并行化和像差校正。(a) 三维多焦点并行记录演示^[20]；(b) 像差校正对比实验结果^[84, 92]

Fig. 15 Parallelization and aberration correction of optical storage. (a) Demonstration of 3D multi-focus parallel recording^[20]; (b) comparative experimental results of aberration correction^[84, 92]

度上恢复焦斑形貌,实现无像差写入(图 15(b))。因此,研究基于深度学习的高精度自适应像差校正系统对于实现不同层的一致性写入和读取以及增加数据写入深度十分关键。并行技术与像差校正技术的联合将进一步提高存储介质内部三维焦场分布的可控性和精准度。

过小的点间距和层间距会加重数据读取时的串扰程度,增加误码率。而深度学习在光学图像分析和数

据处理上的卓越表现,表明它在提高数据读出分辨率、精确度、数据吞吐量以及实现亚衍射光学数据读取方面的潜力^[96-99]。如图 16 所示,利用深度学习网络可以建立低分辨率光学图像与高分辨率光学图像、传统光学图像与突破衍射极限的超分辨率图像、光学图像与编码数据之间的映射关系。另外,高鲁棒性的数据解码网络也为进一步减小点间距、层间距,提高存储密度提供了可能。

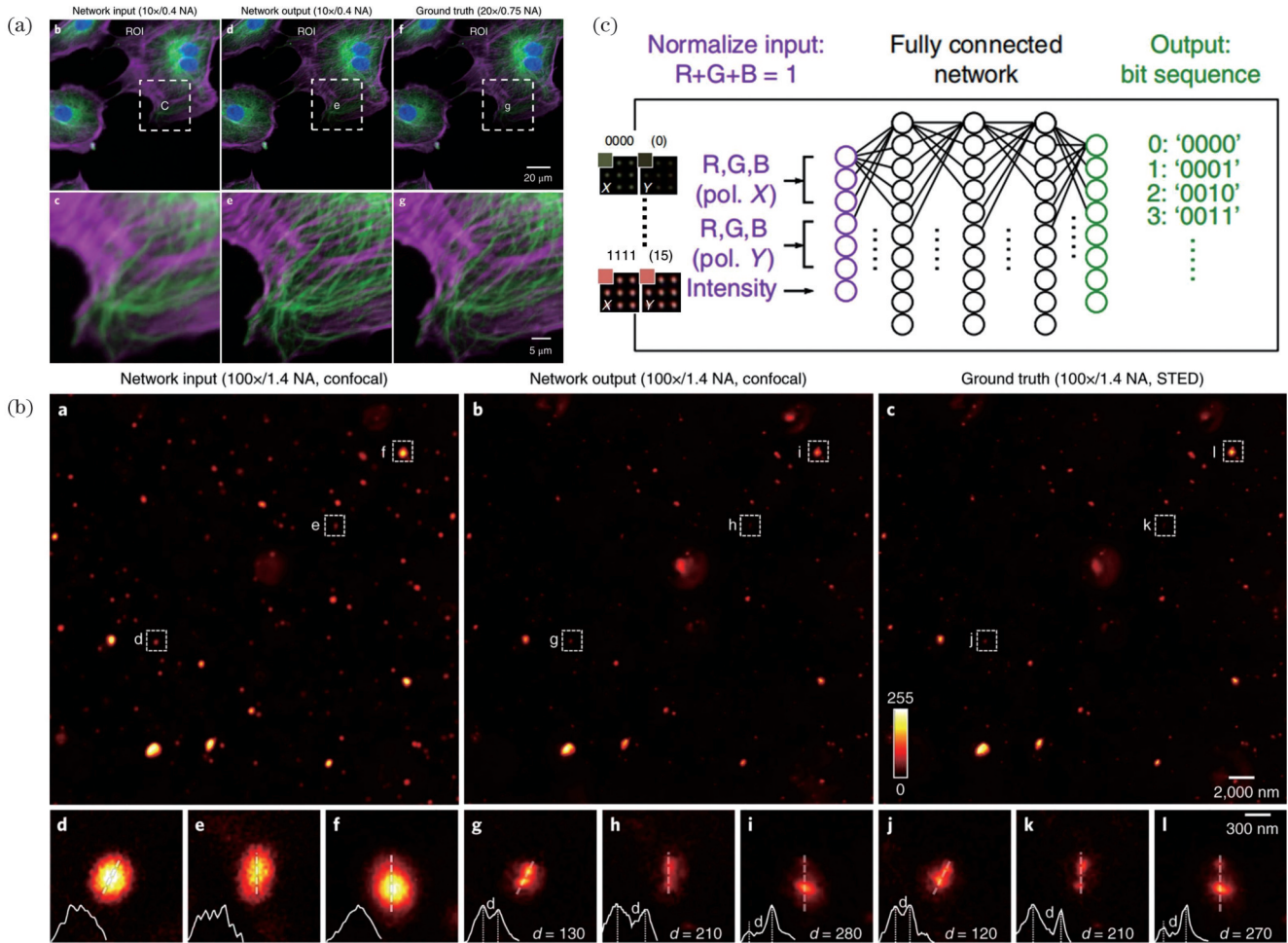


图 16 深度学习下的光存储数据读出。(a)(b)基于深度学习的超分辨成像^[98];(c)基于深度学习的信息解码^[97]

Fig. 16 Data readout from optical storage under deep learning. (a)(b) Super-resolution imaging based on deep learning^[98];
(c) information decoding based on deep learning^[97]

4 结束语

概述了玻璃多维光存储技术近年来的研究进展,包括利用飞秒激光诱导折射率变化、周期性纳米结构形成、离子价态变化、金属纳米团簇/颗粒形成、量子点/纳米晶析出等多种方案。具体分析了当前玻璃光存储在读写速度、读写精度、存储密度、存储容量等方面面临的挑战,并展望了深度学习在全面提高光存储性能方面的应用潜力。相信具有超大存储容量、超快读写速度和超高读写精度的玻璃光存储技术将为数据存储体系的创新带来新的机遇。

参 考 文 献

- [1] Reinsel D, Gantz J, Rydning J. The digitization of the world from edge to core[EB/OL]. (2018-11-05)[2022-01-25]. <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf>.
- [2] Gu M, Li X P, Cao Y Y. Optical storage arrays: a perspective for future big data storage[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(5): e177.
- [3] 吴晨雪, 胡巧, 赵苗, 等. 磁光电混合存储技术研究综述[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 070003.
Wu C X, Hu Q, Zhao M, et al. Review on magnetic-optical-electric hybrid storage technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 070003.
- [4] Lin X A, Liu J P, Hao J Y, et al. Collinear holographic data storage technologies[J]. Opto-Electronic Advances, 2020, 3(3):

- 190004.
- [5] Zhai Y Y, Cao L, Liu Y, et al. A review of polarization-sensitive materials for polarization holography[J]. *Materials*, 2020, 13(23): 5562.
- [6] Yoneda N, Saita Y, Nomura T. Computer-generated-hologram-based holographic data storage using common-path off-axis digital holography[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2796-2799.
- [7] Qu G Y, Yang W H, Song Q H, et al. Reprogrammable meta-hologram for optical encryption[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5484.
- [8] Yoneda N, Nobukawa T, Morimoto T, et al. Common-path angular-multiplexing holographic data storage based on computer-generated holography[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(12): 2920-2923.
- [9] Hu P, Li J H, Jin J C, et al. Highly sensitive photopolymer for holographic data storage containing methacryl polyhedral oligomeric silsesquioxane[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(18): 21544-21554.
- [10] Wang J Y, Tan X D, Qi P L, et al. Linear polarization holography [J]. *Opto-Electronic Science*, 2022, 1(2): 210009.
- [11] 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.
- [12] Chen K X, Guan Z Q, Li Z L, et al. Computer-generated holographic nanoprinting[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(1): 2200448.
- [13] Ouyang X, Xu Y, Feng Z W, et al. Polychromatic and polarized multilevel optical data storage[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(5): 2447-2452.
- [14] Ouyang X, Xu Y, Xian M C, et al. Synthetic helical dichroism for six-dimensional optical orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(12): 901-907.
- [15] Li X, Chen Q M, Zhang X E, et al. Time-sequential color code division multiplexing holographic display with metasurface[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023: 220060.
- [16] Zhao R Z, Sain B, Wei Q S, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 95.
- [17] Zheng Y B, Liu H Y, Xiang J, et al. Hot luminescence from gold nanoflowers and its application in high-density optical data storage [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9262-9275.
- [18] Zijlstra P, Chon J W M, Gu M. Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods[J]. *Nature*, 2009, 459(7245): 410-413.
- [19] Li X P, Cao Y Y, Gu M. Superresolution-focal-volume induced 3.0 Tbytes/disk capacity by focusing a radially polarized beam[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2510-2512.
- [20] Li X P, Cao Y Y, Tian N A, et al. Multifocal optical nanoscopy for big data recording at 30 TB capacity and gigabits/second data rate[J]. *Optica*, 2015, 2(6): 567-570.
- [21] Wang B, Shi J M, Zhang T Y, et al. Improved lateral resolution with an annular vortex depletion beam in STED microscopy[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 4885-4888.
- [22] Zhang Z X, Li Z Y, Lei J A, et al. Environmentally robust immersion supercritical lens with an invariable sub-diffraction-limited focal spot[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(10): 2296-2299.
- [23] Zhu L W, Cao Y Y, Chen Q Q, et al. Near-perfect fidelity polarization-encoded multilayer optical data storage based on aligned gold nanorods[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021, 4(11): 210002.
- [24] Chen X, Gu M. Two-beam ultrafast laser scribing of graphene patterns with 90-nm subdiffraction feature size[J]. *Ultrafast Science*, 2022, 2022: 0001.
- [25] Zhang J Y, Gecevičius M, Beresna M, et al. Seemingly unlimited lifetime data storage in nanostructured glass[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(3): 033901.
- [26] 孙轲, 孙盛芝, 邱建荣. 玻璃基类介质光存储研究发展综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111407.
- Sun K, Sun S Z, Qiu J R. Review on research progress of glasses used for optical storage[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111407.
- [27] Glezer E N, Milosavljevic M, Huang L, et al. Three-dimensional optical storage inside transparent materials[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(24): 2023-2025.
- [28] Qiu J R, Miura K, Inouye H, et al. Three-dimensional optical storage inside a silica glass by using a focused femtosecond pulsed laser[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms*, 1998, 141(1/2/3/4): 699-703.
- [29] Storage technology developed for fused silica glass to record and read digital data in the order of CD recording density[EB/OL]. (2012-09-24)[2022-01-25]. <https://www.hitachi.com/New/cnews/120924.html>.
- [30] Lin Z Y, Hong M H. Femtosecond laser precision engineering: from micron, submicron, to nanoscale[J]. *Ultrafast Science*, 2021, 2021: 9783514.
- [31] Yao J L, Qi D L, Liang H T, et al. Exploring femtosecond laser ablation by snapshot ultrafast imaging and molecular dynamics simulation[J]. *Ultrafast Science*, 2022, 2022: 9754131.
- [32] 李欣欣, 李兴, 王翼猛, 等. 激光精密加工, 点亮智能制造[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1902001.
- Li X X, Li X, Wang Y M, et al. Laser precision machining lights up intelligent manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1902001.
- [33] Yong J L, Yang Q, Hou X, et al. Nature-inspired superwettability achieved by femtosecond lasers[J]. *Ultrafast Science*, 2022, 2022: 9895418.
- [34] Sudrie L, Franco M, Prade B, et al. Writing of permanent birefringent microlayers in bulk fused silica with femtosecond laser pulses[J]. *Optics Communications*, 1999, 171(4/5/6): 279-284.
- [35] Shimotsuna Y, Kazansky P G, Qiu J R, et al. Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(24): 247405.
- [36] Taylor R, Hnatovsky C, Simova E. Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(1/2): 26-46.
- [37] Zhang J E, Tan D Z, Cao K Q, et al. Large area patterning of ultra-high thermal-stable structural colors in transparent solids[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(3): 030501.
- [38] Lei Y H, Wang H J, Shayeganrad G, et al. Ultrafast laser nanostructuring in transparent materials for beam shaping and data storage[J]. *Optical Materials Express*, 2022, 12(9): 3327-3355.
- [39] 王磊, 张翔, 王熠, 等. 飞秒激光永久光存储的发展及挑战[J]. *中国激光*, 2022, 49(10): 1002504.
- Wang L, Zhang X, Wang Y, et al. Femtosecond laser direct writing for eternal data storage: advances and challenges[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(10): 1002504.
- [40] Shimotsuna Y, Sakakura M, Kazansky P G, et al. Ultrafast manipulation of self-assembled form birefringence in glass[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(36): 4039-4043.
- [41] Beresna M, Gecevičius M, Kazansky P G, et al. Exciton mediated self-organization in glass driven by ultrashort light pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(5): 053120.
- [42] Sakakura M, Lei Y H, Wang L, et al. Ultralow-loss geometric phase and polarization shaping by ultrafast laser writing in silica glass[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 15.
- [43] Wang H J, Lei Y H, Wang L, et al. 100-layer error-free 5D optical data storage by ultrafast laser nanostructuring in glass[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(4): 2100563.
- [44] Yan Z, Gao J C, Beresna M, et al. Near-field mediated 40 nm in-volume glass fabrication by femtosecond laser[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(4): 2101676.
- [45] Lei Y H, Sakakura M, Wang L, et al. High speed ultrafast laser anisotropic nanostructuring by energy deposition control via near-field enhancement[J]. *Optica*, 2021, 8(11): 1365-1371.

- [46] Yan Z, Li P Y, Gao J C, et al. Anisotropic nanostructure generated by a spatial-temporal manipulated picosecond pulse for multidimensional optical data storage[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(21): 5485-5488.
- [47] 张博, 王卓, 孙轲, 等. 超快激光在玻璃内部诱导选择性晶化技术研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(4): 1033-1045.
Zhang B, Wang Z, Sun K, et al. Recent research progress on ultrafast laser-induced selective crystallization in glasses[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(4): 1033-1045.
- [48] Zhang B, Tan D Z, Liu X F, et al. Self-organized periodic crystallization in unconventional glass created by an ultrafast laser for optical attenuation in the broadband near-infrared region[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(20): 1900593.
- [49] Cao J, Poumellec B, Mazerolles L, et al. Nanoscale phase separation in lithium niobium silicate glass by femtosecond laser irradiation[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, 100(1): 115-124.
- [50] Cao J, Lancry M, Brisset F, et al. Femtosecond laser-induced crystallization in glasses: growth dynamics for orientable nanostructure and nanocrystallization[J]. *Crystal Growth & Design*, 2019, 19(4): 2189-2205.
- [51] Zhang B, Wang Z, Tan D Z, et al. Ultrafast laser inducing continuous periodic crystallization in the glass activated via laser-prepared crystallite-seeds[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(8): 2001962.
- [52] Zhang B, Tan D Z, Wang Z, et al. Self-organized phase-transition lithography for all-inorganic photonic textures[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 93.
- [53] Wang Z, Tan D Z, Qiu J R. Single-shot photon recording for three-dimensional memory with prospects of high capacity[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(22): 6274-6277.
- [54] Wang Z, Zhang B, Tan D Z, et al. Long-term optical information storage in glass with ultraviolet-light-preprocessing-induced enhancement of the signal-to-noise ratio[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(16): 3937-3940.
- [55] Wang Z, Zhang B, Tan D Z, et al. Ostensibly perpetual optical data storage in glass with ultra-high stability and tailored photoluminescence[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023, 6(1): 220008.
- [56] Miura K, Qiu J R, Fujiwara S, et al. Three-dimensional optical memory with rewriteable and ultrahigh density using the valence-state change of samarium ions[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(13): 2263-2265.
- [57] Zheng Y, Yao Y H, Deng L Z, et al. Valence state manipulation of Sm^{3+} ions via a phase-shaped femtosecond laser field[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(2): 144-148.
- [58] Lin S S, Lin H, Huang Q M, et al. A photostimulated BaSi_2O_5 : Eu^{2+} , Nd^{3+} phosphor-in-glass for erasable-rewritable optical storage medium[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(4): 1970022.
- [59] Lin S S, Lin H, Ma C G, et al. High-security-level multi-dimensional optical storage medium: nanostructured glass embedded with LiGa_5O_8 : Mn^{2+} with photostimulated luminescence[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 22.
- [60] Yuan L F, Jin Y H, Su Y, et al. Optically stimulated luminescence phosphors: principles, applications, and prospects[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(12): 2000123.
- [61] Long Z W, Wen Y G, Zhou J H, et al. No-interference reading for optical information storage and ultra-multiple anti-counterfeiting applications by designing targeted recombination in charge carrier trapping phosphors[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(10): 1900006.
- [62] Wu H, Wang M Y, Huai L W, et al. Optical storage and operation based on photostimulated luminescence[J]. *Nano Energy*, 2021, 90: 106546.
- [63] Wei X, Zhao W W, Zheng T, et al. Laser-modified luminescence for optical data storage[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(11): 117901.
- [64] Hu Z, Huang X J, Yang Z W, et al. Reversible 3D optical data storage and information encryption in photo-modulated transparent glass medium[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 140.
- [65] Royon A, Bourhis K, Bellec M, et al. Silver clusters embedded in glass as a perennial high capacity optical recording medium[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(46): 5282-5286.
- [66] Petit Y, Danto S, Guérineau T, et al. On the femtosecond laser-induced photochemistry in silver-containing oxide glasses: mechanisms, related optical and physico-chemical properties, and technological applications[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2018, 7(5): 291-309.
- [67] Kunwar P, Soman P. Direct laser writing of fluorescent silver nanoclusters: a review of methods and applications[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(8): 7325-7342.
- [68] Shakhgildyan G Y, Ziyatdinova M Z, Vetchinnikov M P, et al. Thermally-induced precipitation of gold nanoparticles in phosphate glass: effect on the optical properties of Er^{3+} ions[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2020, 550: 120408.
- [69] Tan D Z, Jiang P, Xu B B, et al. Single-pulse-induced ultrafast spatial clustering of metal in glass: fine tunability and application[J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, 2(4): 2000121.
- [70] Zhao H P, Cun Y K, Bai X, et al. Entirely reversible photochromic glass with high coloration and luminescence contrast for 3D optical storage[J]. *ACS Energy Letters*, 2022, 7(6): 2060-2069.
- [71] Tan D Z, China Z L H, Sun K, et al. Photo-processing of perovskites: current research status and challenges[J]. *Opto-Electronic Science*, 2022, 1(11): 220014.
- [72] Huang X J, Guo Q Y, Kang S L, et al. Three-dimensional laser-assisted patterning of blue-emissive metal halide perovskite nanocrystals inside a glass with switchable photoluminescence[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 3150-3158.
- [73] Huang X J, Guo Q Y, Yang D D, et al. Reversible 3D laser printing of perovskite quantum dots inside a transparent medium[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(2): 82-88.
- [74] Sun K, Tan D Z, Song J, et al. Highly emissive deep-red perovskite quantum dots in glass: photoinduced thermal engineering and applications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(11): 2100094.
- [75] Sun K, Tan D Z, Fang X Y, et al. Three-dimensional direct lithography of stable perovskite nanocrystals in glass[J]. *Science*, 2022, 375(6578): 307-310.
- [76] Sun K, Li X K, Tan D Z, et al. Pure blue perovskites nanocrystals in glass: ultrafast laser direct writing and bandgap tuning[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(5): 2370022.
- [77] Hu Y Z, Ye Y, Zhang W C, et al. Laser-induced inverted patterning of nanocrystals embedded glass for micro-light-emitting diodes[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 150: 138-144.
- [78] 李昕阔, 谭德志, 刘艺, 等. 超快激光在玻璃内部直写纳米晶及其应用[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(11): 3781-3794.
Li X K, Tan D Z, Liu Y, et al. Ultrafast laser direct writing of nanocrystals in glass and its application[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(11): 3781-3794.
- [79] Qiu J R, Jiang X W, Zhu C S, et al. Manipulation of gold nanoparticles inside transparent materials[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2004, 43(17): 2230-2234.
- [80] Tan D Z, Zhang B, Qiu J R. Ultrafast laser direct writing in glass: thermal accumulation engineering and applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(9): 2000455.
- [81] 王一同, 周宏强, 闫景逍, 等. 基于深度学习算法的计算光学研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1918004.
Wang Y T, Zhou H Q, Yan J X, et al. Advances in computational optics based on deep learning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1918004.
- [82] Lamon S, Zhang Q M, Gu M. Nanophotonics-enabled optical data

- storage in the age of machine learning[J]. *APL Photonics*, 2021, 6(11): 110902.
- [83] Wang J, Hayasaki Y, Zhang F Y, et al. Three-dimensional holographic femtosecond laser parallel processing method with the fractional Fourier transform for glass substrates[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(11): 16364-16373.
- [84] Ren H R, Lin H, Li X P, et al. Three-dimensional parallel recording with a Debye diffraction-limited and aberration-free volumetric multifocal array[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1621-1624.
- [85] 周源, 李润泽, 于湘华, 等. 基于液晶空间光调制器的光场调控技术及应用进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1123001.
Zhou Y, Li R Z, Yu X H, et al. Progress in study and application of optical field modulation technology based on liquid crystal spatial light modulators (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1123001.
- [86] Hossein Eybposh M, Caira N W, Atisa M, et al. DeepCGH: 3D computer-generated holography using deep learning[J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 26636-26650.
- [87] Peng Y F, Choi S, Padmanaban N, et al. Neural holography with camera-in-the-loop training[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 39(6): 185.
- [88] Wu J C, Liu K X, Sui X M, et al. High-speed computer-generated holography using an autoencoder-based deep neural network[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(12): 2908-2911.
- [89] Salter P S, Booth M J. Adaptive optics in laser processing[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 110.
- [90] Maclair C, Mermillod-Blondin A, Huot N, et al. Ultrafast laser writing of homogeneous longitudinal waveguides in glasses using dynamic wavefront correction[J]. *Optics Express*, 2008, 16(8): 5481-5492.
- [91] Simmonds R D, Salter P S, Jesacher A, et al. Three dimensional laser microfabrication in diamond using a dual adaptive optics system[J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 24122-24128.
- [92] Jin Y C, Zhang Y Y, Hu L J, et al. Machine learning guided rapid focusing with sensor-less aberration corrections[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30162-30171.
- [93] Zhang Y Y, Wu C X, Song Y C, et al. Machine learning based adaptive optics for doughnut-shaped beam[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16871-16881.
- [94] Wang Y, Wang H, Li Y M, et al. High-accuracy, direct aberration determination using self-attention-armed deep convolutional neural networks[J]. *Journal of Microscopy*, 2022, 286(1): 13-21.
- [95] Zhang H Z, Xu J M, Li H Y, et al. Modulation of high-quality internal multifoci based on modified three-dimensional Fourier transform[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(4): 900-903.
- [96] Rivenson Y, Göröcs Z, Günaydin H, et al. Deep learning microscopy[J]. *Optica*, 2017, 4(11): 1437-1443.
- [97] Wiecha P R, Leceste A, Mallet N, et al. Pushing the limits of optical information storage using deep learning[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 237-244.
- [98] Wang H D, Rivenson Y, Jin Y Y, et al. Deep learning enables cross-modality super-resolution in fluorescence microscopy[J]. *Nature Methods*, 2019, 16(1): 103-110.
- [99] Qiao C, Li D, Guo Y T, et al. Evaluation and development of deep neural networks for image super-resolution in optical microscopy[J]. *Nature Methods*, 2021, 18(2): 194-202.

Research Progress on Glass-Based Multi-dimensional Optical Storage Technology

Wu Jiajia¹, Gao Kai¹, Chen Chenduan¹, Wang Zhiqiang¹, Qiu Jianrong², Tan Dezhi^{1,3*}

¹*Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, Zhejiang, China;*

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

³*School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China*

Abstract

Significance Information storage is an important means of human civilization inheritance and a necessary link for social and economic development. With the advent of the era of big data, the amount of data generated by various industries is increasing explosively, presenting mankind with an unprecedented flood of data. According to International Data Corporation (IDC), the global data volume will reach 175 ZB by 2025. Therefore, achieving low energy consumption and long-term secure data storage is an urgent task for the construction of digital society. At present, widely used data storage devices, such as magnetic tapes, hard disks, and solid-state drives, generally face the problems of high energy consumption and short life. In contrast, although optical storage has slow read-write speed and small capacity, it has unique advantages in terms of cost, energy consumption, reliability, and service life, and is considered likely to be one of the most important directions of development in the field of information storage in the future. As an ideal optical storage medium, glass has excellent thermal, optical, and chemical stability, and its data storage life can even reach hundreds of millions of years. Therefore, new optical storage technology using glass as the storage medium provides an effective solution for the permanent storage of large-scale warm and cold data, which is of great significance for alleviating the pressure of big data storage and ensuring the safe and efficient development of China's digital economy.

In recent decades, researchers have continuously explored the relevant mechanisms and technical means for optical storage in glass, making significant progress. However, from the perspective of practical application and industrialization, glass optical storage still faces certain challenges. Therefore, a summary and prospect of current research are of important reference value for the future development of this field, which is also necessary.

Progress We review the research progress and dimension multiplexing of glass optical storage in recent years. First, we introduce femtosecond laser-induced multi-dimensional optical storage technologies based on refractive index change, anisotropic periodic

nanostructure formation, ion valence change, metal nanocluster/particle formation, and quantum dot/nanocrystal precipitation, including their formation mechanism and performance parameters, such as storage density and storage life. We then discuss some challenges in the field and analyze the potential of light field modulation technology and deep learning technology to improve the performance of optical storage.

Conclusions and Prospects Glass optical storage technology provides an effective solution for the permanent storage of information in the big data era. In summary, current glass optical storage technology is developing toward ultra-high density, multi-dimensional multiplexing, ultra-fast reading and writing, erasable rewriting, and ultra-long life. Its practicality and industrialization merit further exploration. We firmly believe that in the near future, the realization of glass optical storage technology with large storage capacity, ultra-fast reading and writing speed, and ultra-high reading and writing precision will open new opportunities for the innovation of data storage systems.

Key words holography; laser material processing; optical storage; glass; multi-dimension multiplexing; light field modulation; deep learning