



DOI: 10.12086/oe.2019.180571

大容量光存储的维度扩展

陈韦良^{1,2}, 张静宇^{1,2*}¹华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;²华中科技大学信息存储系统教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要: 随着数字化时代的发展, 人类正进入一个大数据纪元。然而海量产生的数据已很难被全部记录, 据估算, 现有的数据载体已不足以存储人类产生数据的一半, 如果该现状得不到改善, 那么大量数据将会被强制舍弃。但改善这样的现状面临着难题, 阿贝衍射极限的存在制约了光存储单元的大小, 这使得传统光存储的容量被激光波长和物镜的数值孔径所限制。这个难题可以通过引入多维复用技术替代性地解决, 本文针对多维存储中材料三维空间、偏振、波长等复用技术, 综述了维度扩展在光存储中的研究成果以及未来的发展趋势。其中, 着重介绍了基于纳米光栅的五维度光存储的发展历史、当前现状及亟需解决的问题。

关键词: 多维度光存储; 光存储介质; 光与物质相互作用

中图分类号: TP333; TB872

文献标志码: A

引用格式: 陈韦良, 张静宇. 大容量光存储的维度扩展[J]. 光电工程, 2019, 46(3): 180571

Dimension expansion of high-capacity optical data storage

Chen Weiliang^{1,2}, Zhang Jingyu^{1,2*}¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;²Key Laboratory of Information Storage System Ministry of Education of China, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract: Human beings are entering a Big Data era, which has significantly boosted the current digital economy and society. But in reality, all current data storage technologies and mediums can only store less than half of what we generate, which means most of the data will be forcibly lost if without breakthrough in high-capacity storage technologies. However, Ernst Abbe set a fundamental barrier that limits the smallest feature size of a recording voxel to approximately half of the wavelength. Alternatively, this limitation could be overcome by implementing multiplex technology. In this review, techniques employed various multiplex dimensions such as 3D space, polarization and wavelength are briefly introduced. Especially, we highlight the development history, current state of the art and urgent challenges of five-dimensional optical data storage based on laser-induced nanogratings.

Keywords: multi-dimensional optical data storage; optical storage media; interaction of light and matter

Citation: Chen W L, Zhang J Y. Dimension expansion of high-capacity optical data storage[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(3): 180571

收稿日期: 2018-11-06; 收到修改稿日期: 2018-12-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61432007)

作者简介: 陈韦良(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事超快激光加工、多维度光存储的研究。E-mail: williamchen@hust.edu.cn

通信作者: 张静宇(1989-), 男, 博士, 研究员, 主要从事超快激光加工、多维度光存储的研究。E-mail: jy_z@hust.edu.cn

1 引言

我们正处于一个数据量爆炸式增长的时代,从 2000 年开始,全球产生的年数据总量每两年就会翻倍,据国际数据公司(International Data Corporation, IDC)预计,到 2025 年,全球当年就将产生 175 ZB 的数据总量^[1]。这些海量的数据将带来许多问题:1) 电力的消耗。根据美国自然资源保护协会(Natural Resources Defence Council, NRDC)的统计数据,到 2020 年全美用在数据存储上的能量将达到 1400 亿千瓦时,相当于英国 2013 年全国发电量的 1/3^[2]。2) 空间的占用。现有的主流存储技术(磁存储或 DVD(digital versatile disc))存储的单位存储密度都很低,推高了数据存储的空间成本。根据 IDC 的数据,如果将全球所有的数据都填充到 DVD 碟片中,这些碟片堆起来高度将足以从地球往返月球一趟^[3]。而呈指数倍增长的全球年生成数据总量将加大对空间的占用,在 21 世纪末期,“数据中心围城”现象或将不可避免。3) 使用寿命短。无论是磁存储还是主流的电存储都有着存储寿命短的问题,需要长期通电或必须在短期内重写数据,这将大大增加数据存储的使用成本。CD(compact disc)、DVD 和蓝光光盘可以达到 50 年以上。而在所有数据存储技术中,光存储因其“离线”存储的特性而有着绿色节能的优点,以 50 年使用周期估计,光存储系统所消耗的电力将不到硬盘系统的 1%^[4],这得益于光存储系统在处于闲置状态时并不消耗电力的特点。因此,光存储被认为将成为未来海量信息存储的主要载体。而如何在现有光存储技术的基础上实现突破,研发一种大容量、长寿命的光存储技术,是数据存储行业的一个核心问题,也是国内外科研界的研究重点。

传统的光存储系统受限于光学衍射极限,容量已达到瓶颈,继续提升容量可采用全息存储^[5]及多维度

存储^[6]等充分利用存储介质特性的技术,或者采取突破衍射极限的方式^[7]。其中多维度光存储利用存储介质对光的不同参数的选择性响应,从而在多个复用维度上记录数字信息。在光存储中引入复用技术可更加有效地利用存储介质的物理空间,充分发挥光与物质相互作用的特性,大幅提升存储密度。

国内在光存储领域深耕多年,金国藩院士团队开发的体全息光存储^[8-9],干福熹院士团队开发的基于新介质、超分辨技术的高密度光存储^[10-12],谢长生团队开发的超大容量光盘库系统及红光高清光碟^[13-14],潘龙法团队开发的多阶游程光存储技术^[15-16],谭小地团队开发的同轴全息存储技术^[17]都在国内外处于领先地位。本文针对多维度光存储,综述了国内外众多课题组对各复用维度的研究历史及现状,着重介绍了基于纳米光栅的五维度光存储技术,探究了目前光存储多维复用中存在的一些问题,并对未来研究进行了展望。

2 传统光存储

传统光存储通过激光在光盘的刻录层产生结构性变化从而改变局部区域的反射率,达到存储数据的目的,是一种二维的数据存储方式。最初的光存储技术 CD 出现在 20 世纪 80 年代,由于记录波长(λ)780 nm 和数值孔径(numerical aperture, NA)0.45 的局限,CD 的存储容量只有 650 MB~750 MB。到 1994 年, DVD 的研发人员尝试使用更短的波长和更高的 NA 数值从而降低激光加工区域的大小、提升存储容量。DVD 的记录波长为 650 nm, NA 为 0.6,容量达到 4.7 GB。到 2002 年,索尼等公司开始策划及研发蓝光光碟,蓝光光碟使用了短至 405 nm 的波长,同时将数值孔径提高到 0.85,使得在同样面积的刻录层内可以存储更多的数据,将蓝光光盘单层的存储容量提升至 23.5 GB。但继续降低光存储的波长或增大数值孔径变得十分困难,人们开始尝试采取增加刻录层的方式来提升容量,

表 1 传统光存储技术的参数

Table 1 Parameters of conventional optical data storage technologies

| | CD | DVD | 蓝光 |
|-------------|------|------|------|
| 波长/nm | 780 | 650 | 405 |
| 数值孔径 | 0.45 | 0.6 | 0.85 |
| 轨距/ μ m | 1.6 | 0.74 | 0.32 |
| 单层容量/GB | 0.7 | 4.7 | 23.5 |
| 最多层数 | 1 | 2 | 6 |
| 最大容量/GB | 0.7 | 8.5 | 500 |

但层数的极限仅为 6 层, 提升幅度有限^[18]。表 1 为传统光存储技术的详细参数, 单张碟片的最高容量有望达到 500 GB, 远低于其他存储技术, 并无法解决未来海量数据存储难的问题, 需要新的技术突破, 而多维度复用是主要的技术路线之一。

3 复用维度

目前, 已经开发出的复用维度包括介质的三维空间^[6]、偏振^[19]、波长^[20]以及光强^[21], 如图 1。其中包括基于金纳米棒的波长、偏振、三维空间复用的五维度光存储^[22], 和基于纳米光栅结构的偏振、光强、三维空间复用的五维度光存储^[23]。但受限于材料对光各个参数的响应不同, 六维度光存储一直未得以实现, 另外光的轨道角动量特性虽然已被用在量子存储上^[24], 但在数据长效存储上并未得以实现。本章节将分别阐述多维光存储不同维度的复用方式及其存储原理。

3.1 三维空间

传统光存储受限于存储介质, 记录数据的层数有限, 使得近 99.99% 的碟片体积并没有被利用^[25], 严重制约了存储容量, 如果能将存储介质的三维空间作为新的复用维度, 将大幅提升光存储的容量。最初的设想起源于 1956 年, Hirshberg 提出利用螺吡喃的光致变色现象来设计一种能擦除并重写的三维光存储^[26]。但当时螺吡喃亚稳态间的变化过程受限于单光子吸收作用, 光在到达焦点前就会因散射而消耗绝大部分能量, 三维写入的效果并不理想。直到 1989 年, Rentzepis 等实验展示了利用双光子吸收效应, 在光致变色材料中实现的三维光存储技术(图 2(a))^[6]。由于双光子吸收

效应的非线性特性, 激光的能量可以更好地传递到焦点处, 从而使得数据的三维多层写入成为可能。该实验中使用的是两束相互垂直且分别聚焦的 1064 nm 激光和其两倍频 532 nm 激光, 系统较为复杂。而到了 1991 年, Strickler 等首次实现了单光束的基于双光子吸收的光存储技术^[27], 但其存储介质为液态的丙烯酸酯混合物, 并不是很理想的存储介质。虽然受限于存储介质, 但该技术仍然实现了共 25 层的数据存储, 每个数据点宽度为 500 nm, 数据点中心距离为 1 μm 和层间距为 3 μm , 达到了约 1.3 Tbits/cm³ 存储密度的理论参数^[27]。随着对多光子吸收效应的深入研究, 更多可利用该效应实现三维度光存储的材料被发现, 这些材料包括光致变色材料^[28-29]、光聚胶^[30-31]、光折变晶体^[32]、熔融石英^[33]、掺杂玻璃^[34]、塑料^[35]等。随着多光子吸收效应在三维光存储上的不断研究, Rentzepis 等在 2009 年发表的结果显示, 当使用 405 nm 波长激光时, 可以将基于光致变色材料的三维光存储的容量提升到 5 TB(图 2(c))^[36-37]。此外, 基于利用超快激光双光子吸收效应改变掺杂玻璃中稀土离子价态的光存储技术也一直在被积极研究^[38], 该工作由邱建荣等于 1999 年首次提出^[39], 最新的研究结果显示利用钐离子价态变化的三维光存储可以达到 TB/cm³ 量级的存储密度^[40]。

虽然基于多光子吸收的三维光存储技术极大地利用了存储介质的三维空间, 但是存储单元的大小仍受限于衍射极限, 其单位碟片的存储容量仅只能达到 TB 量级。为了进一步提升容量, 引入新的复用维度成为了各课题组的研究重点。

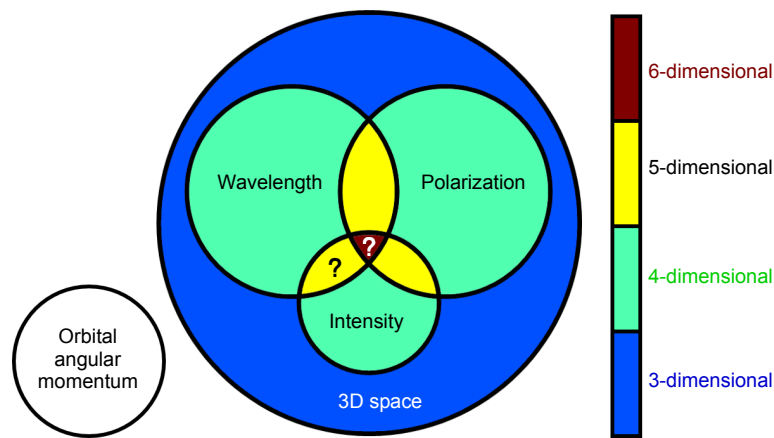


图 1 多维度光存储各复用维度的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multiplexed dimensions in optical data storage

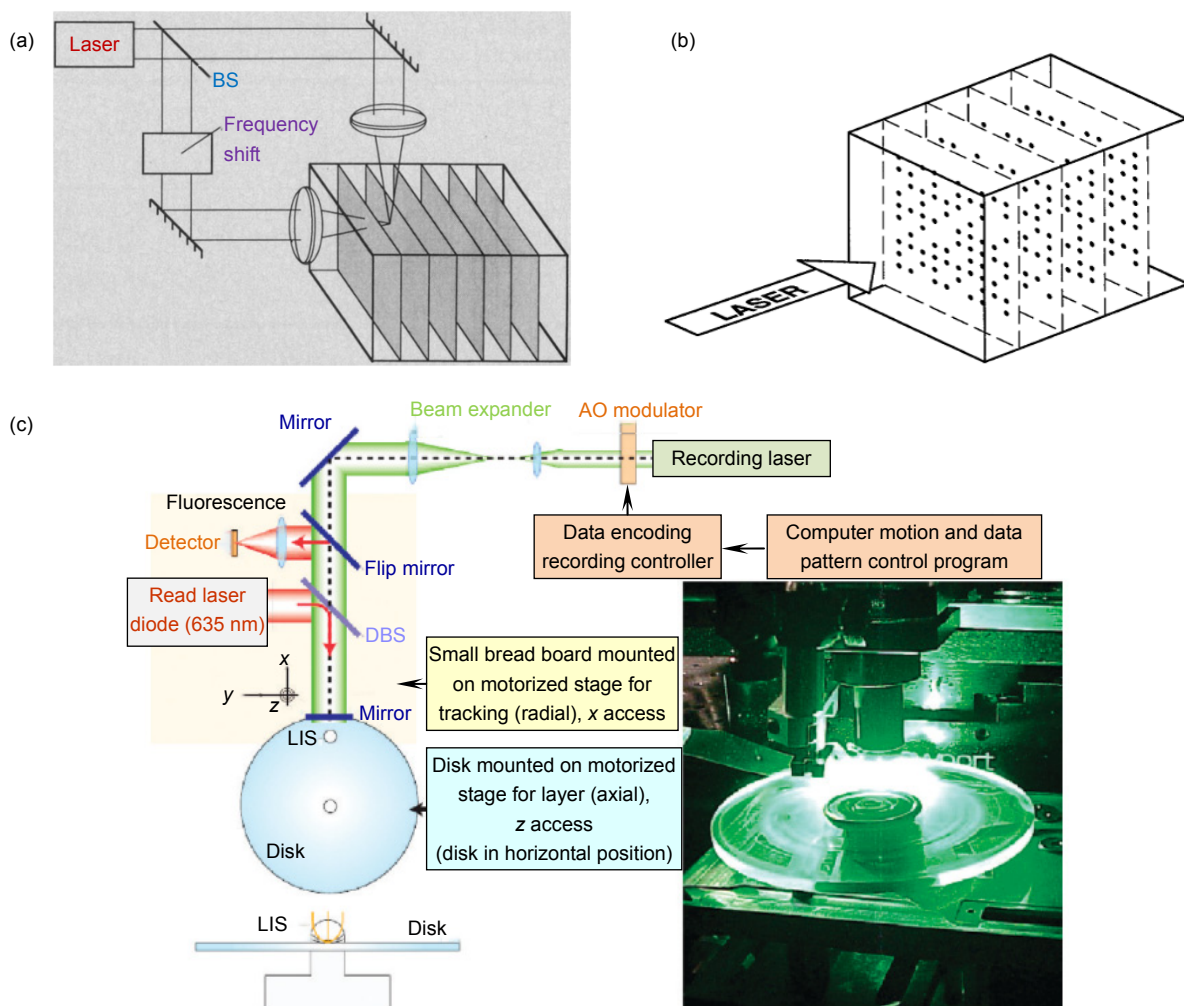


图 2 基于双光子吸收的三维光存储的示意图。(a) 双光束和光致变色介质^[6]；(b) 单光束和熔融石英^[33]；(c) 单光束和光致变色介质^[37]

Fig. 2 Schematic diagram of 3D optical storage system. (a) Two orthogonal recording beams in photochromic medium^[6]; (b) Single beam scheme in fused silica^[33]; (c) Single beam scheme in photochromic medium^[37]

3.2 波长

将波长复用引入到多维度光存储系统中，是基于材料的窄吸收带特性。在 1985 年，Ando 等人提出利用螺苯并吡喃的 J 聚集结构，实现波长复用的多维度光存储^[20]。螺苯并吡喃在自组织时根据堆积结构的不同可以生成 J 型和 H 型两种不同类型的聚集结构，其吸收谱相对于单体将分别表现出红移和蓝移的特性。通过调控聚集结构吸收带的位置，可实现波长复用的多维度光存储^[20,41]。同样是利用材料的窄带宽吸收和增强色散特性，Jensen 等在 2000 年利用银纳米颗粒的局域表面等离子共振(localized surface plasmon resonance, LSPR)特性，开发了一种波长复用的多维度光存储(图 3(a)，图 3(b))^[42]。同年，Ditlbacher 等同样利用

银纳米颗粒实现了波长复用的多维度光存储(图 3(c)，图 3(d))^[43]。

值得一提的是，类似于 CD-R、BD-R LTH 等基于染料的传统二维光存储技术，基于染料的波长复用多维度光存储也得到了继续的研究与发展。2004 年 Pham 等人采用三种不同吸收及发射波长的染料纳米颗粒，将其堆叠成三维结构并实现了波长复用的多维度光存储^[44]。

3.3 偏振

基于染料的多维光存储技术其实并不陌生，继日本静冈大学和大阪大学的研究者在 1998 年利用光折变晶体实现三维光存储之后^[32]，1999 年静冈大学和丰田研发部的人员进一步实验展示了基于偶氮染料共聚

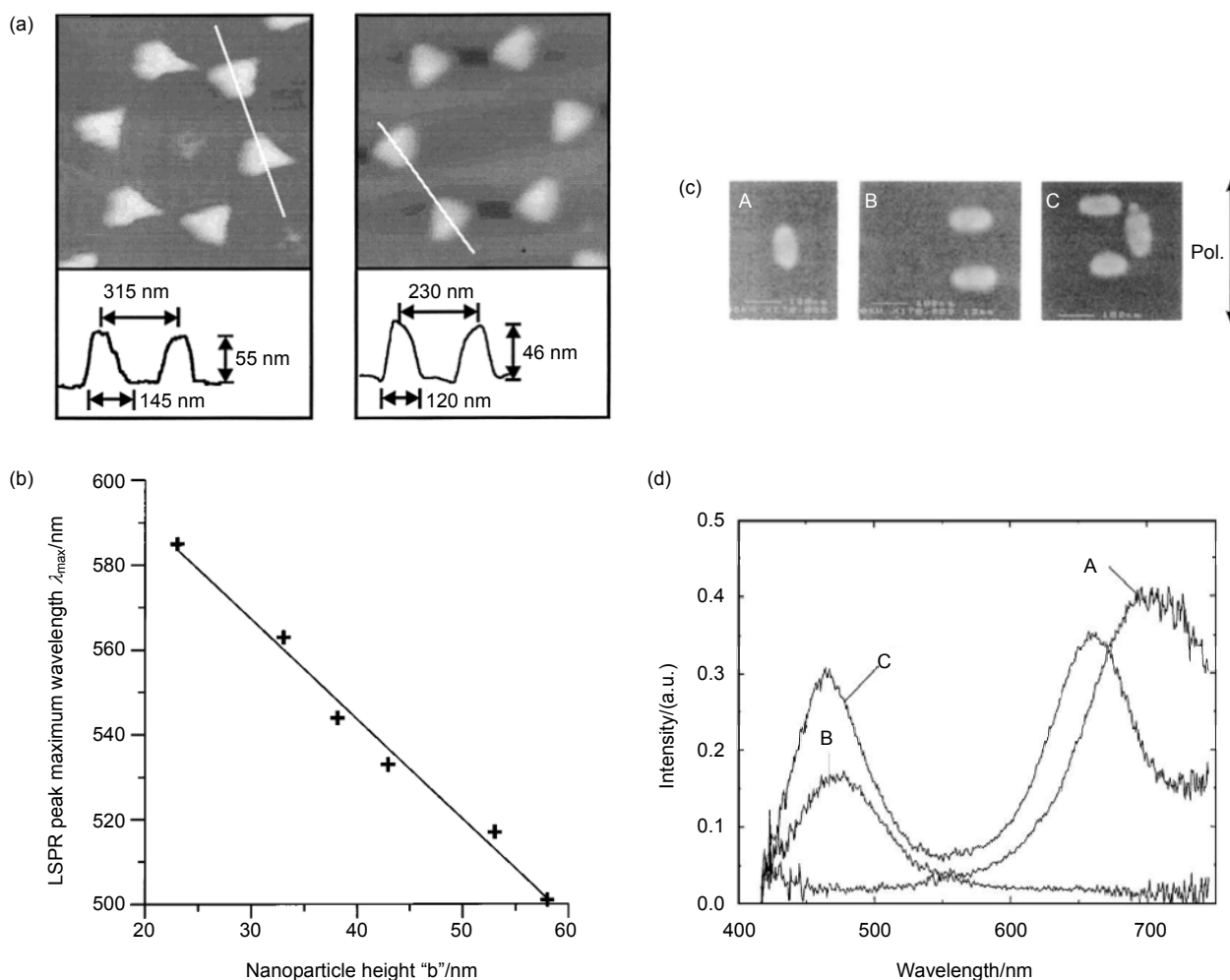


图 3 (a) 银纳米颗粒的原子力显微镜图, 其中左侧的银纳米颗粒为 55 nm 高, 右侧为 46 nm 高; (b) 银纳米颗粒高度和其对 LSPR 波长最大值的实验结果, 图中斜线为其实验结果的线性拟合^[42]; (c) A、B、C 三种不同摆放的银纳米颗粒的扫描电子显微镜图; (d) 对应图 3(c)中三种不同情况下的散射光谱图^[43]
 Fig. 3 (a) Atomic force microscopy profiles of silver nanoparticles; (b) Plot of LSPR peak maximum wavelength vs. nanoparticle height, the slope is the linear fitting of the experimental data^[42]; (c) SEM images of specially designed silver nanoparticles; (d) The corresponding scattering spectra of silver nanoparticles in Fig.3(c)^[43]

物的偏振复用光存储(图 4(a))^[19]。利用反式偶氮染料对偏振方向与其分子长轴方向平行的光的吸收率高于与之垂直的光的特性, 该团队成功实现了对光偏振方向敏感的材料折射率变化, 并实现了数据的擦除及重写。但受限于单光子吸收作用, 该技术仅在材料的二维空间上得以实现, 并没有利用到材料的三维空间。直到 2007 年, 李向平等首次实现了在偶氮染料上的双光子吸收技术, 使得基于偏振方向的不对称性结构终于在三维材料中得以产生, 成功展示了可擦除重写的四维度光存储(图 4(b))^[45]。

除了利用分子结构对偏振光的非对称性吸收, 表面等离子共振(surface plasmon resonance, SPR)的金属

纳米颗粒同样被应用到了基于偏振的多维度光存储中。在 2002 年, Niidome 等人发现经线偏振光处理后的金纳米棒会根据光的偏振方向和纳米棒的取向, 选择性地发生重塑, 并且因为金纳米棒水平和竖直方向所引发的共振模不同而导致材料显示出双色性(图 4(c))^[46]。除了在平面上重塑纳米颗粒的非对称性方向, 顾敏团队在 2012 年发表的另一项工作中, 利用金纳米棒材料和光偏振的三维任意方向调控技术实现了纳米颗粒空间方向复用的多维度光存储^[47]。到 2018 年, 顾敏团队将金纳米棒同有机改性陶瓷(organic modified ceramic, ORMOCER)相结合, 开发出了一种长寿命大容量的偏振复用四维光存储^[48]。

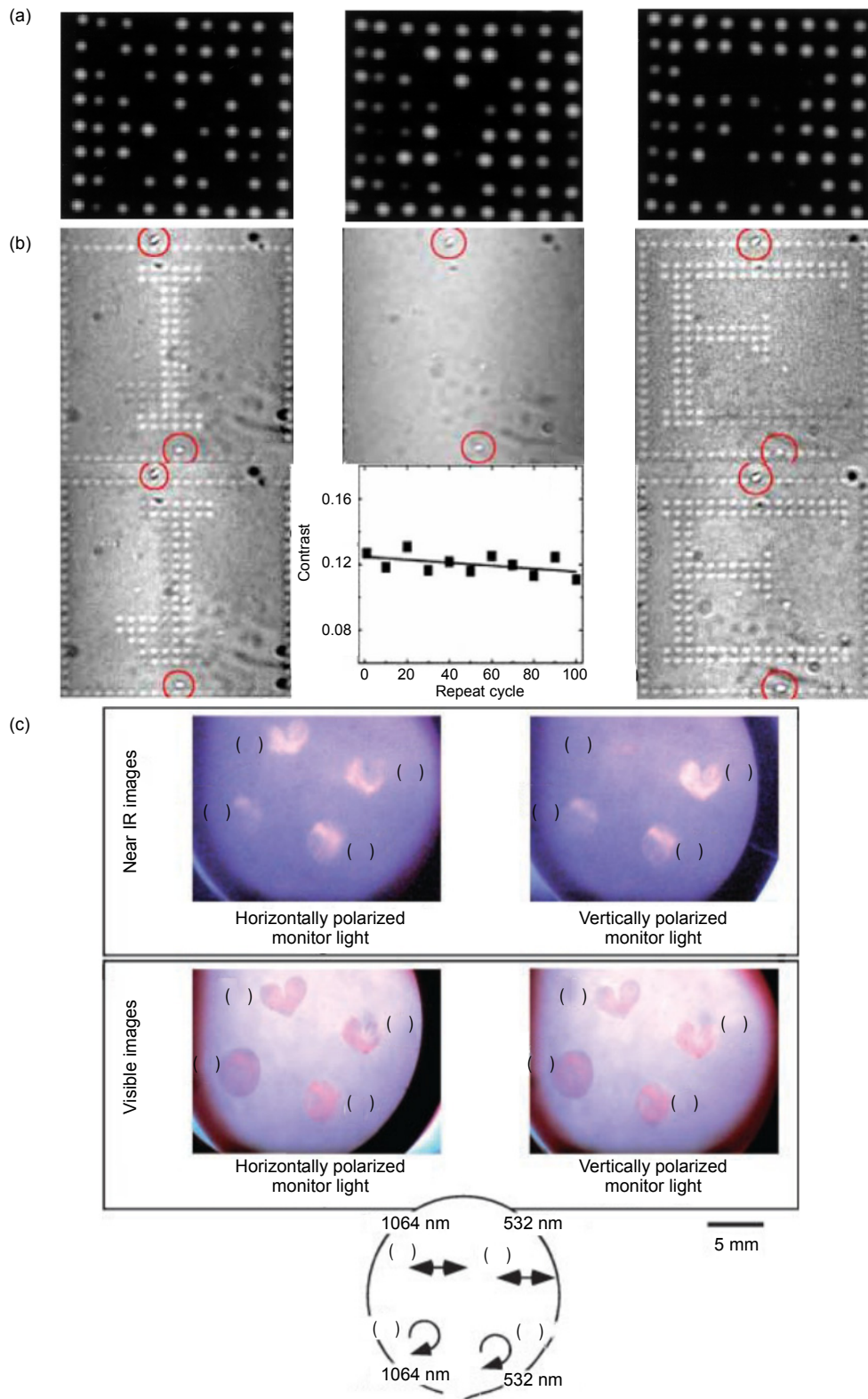


图 4 (a) 利用三种不同极化方向的偏振光在偶氮染料共聚物中完成的数据写入演示^[19]; (b) 利用双光子吸收, 在偶氮染料中完成的数据写入、擦除及重写, 其中字母 I 和 J 被写入后擦除, 并在同一位置写入了字母 F 和 E^[45]; (c) 含有金纳米棒的薄膜材料在不同波长和偏振光照射下, 显示出不同的图案^[46]

Fig. 4 (a) Data writing in azo dye copolymer by irradiating three different linearly polarized light^[19]; (b) Data writing, erasing, and rewriting in azo dye by two-photon absorption process^[45]; (c) Microscope images of the gold-nanorod nanocomposite films irradiated by light with different wavelengths and polarizations^[46]

4 五维度光存储

受限于材料对光不同参数的响应,五维度光存储仅在少数材料中得以实现。其中顾敏团队在 2009 年利用金纳米棒的表面等离子共振特性,实现了基于偏振方向、波长以及三维空间的五维度光存储技术^[22]。顾敏团队在 2017 年通过对无序金纳米棒耦合产生的随机热点编码,实现了高密度的五维光存储,此方法记录数据所需激光能量相较于该团队在 2009 年的方法降低了两个数量级^[49]。而另一种技术是在熔融石英材料中,通过飞秒激光引入纳米光栅双折射结构,实现了基于偏振方向、光强以及三维空间的五维度光存储。在熔融石英内部产生纳米光栅结构发现于 1999 年, Sudrie 等发现通过飞秒激光加工后,在熔融石英内部产生了双折射结构^[50]。同年 Kazansky 等将飞秒激光聚焦到掺锗熔融石英内部,利用多光子吸收效应对其进

行加工,观察到激光的散射会沿着垂直于偏振的方向增强(图 5(a))^[51]。2000 年,邱建荣等发现该垂直于偏振方向的散射光具有一定的记忆性。到 2003 年, Shimotsuma 等将经过研磨后的熔融石英样品置于扫描电子显微镜下进行观察,发现经过飞秒激光加工后的区域形成了一种垂直于偏振方向的周期性结构,该结构最小尺寸仅有 20 nm(图 5(b))^[52]。经超快激光加工后,熔融石英中原有的硅氧键断裂,生成的氧气分子保留在层状结构中而形成了一个纳米多孔的缺氧二氧化硅结构(图 5(c))^[53],而周期间隔排布的纳米多孔层状结构和熔融石英夹层表现出形状双折射的特性,该形状双折射类似于负单轴晶体,同正单轴晶体石英的双折射数值在同一量级(图 5(d))^[54]。由纳米光栅形成的双折射,其慢轴角度及光程延迟值可以分别由飞秒激光的偏振和光强来独立控制,因为这样的特性,纳米光栅结构可以用于基于偏振、光强、三维空间的五维

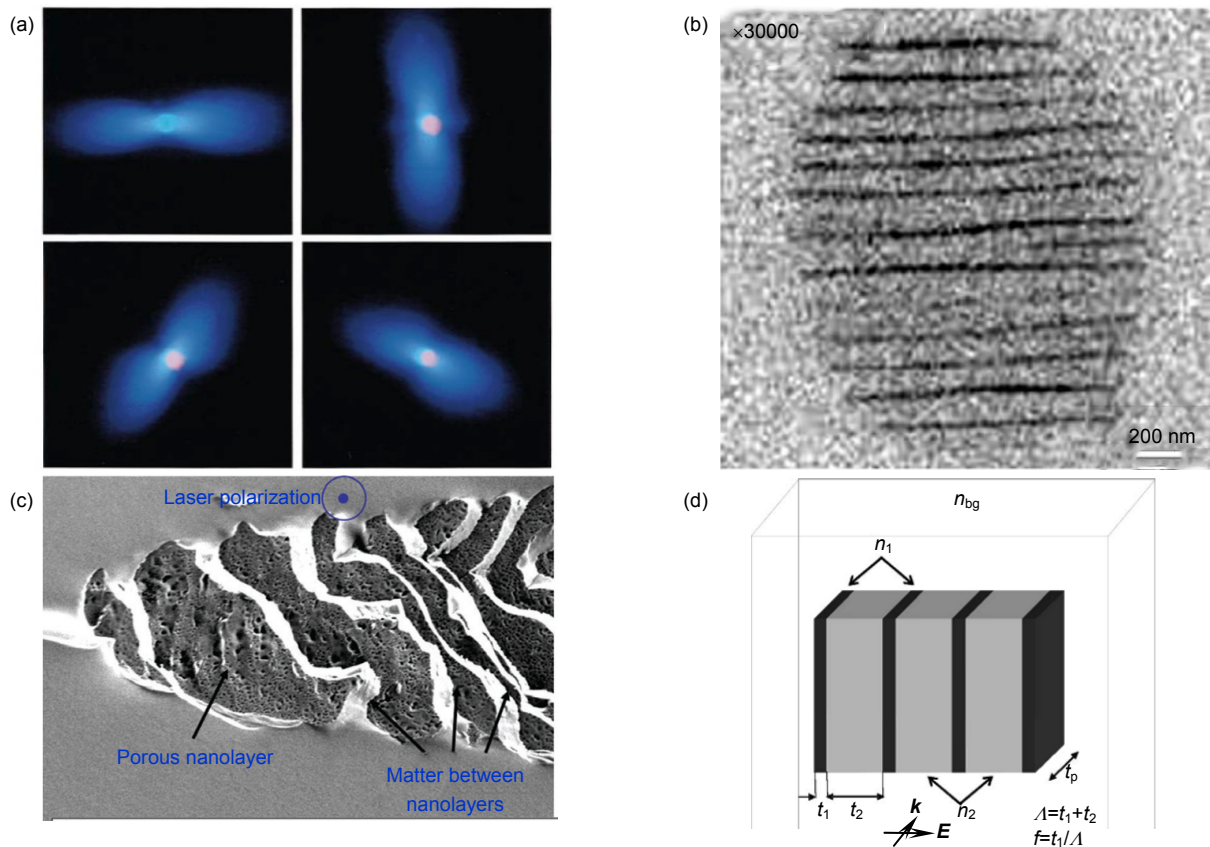


图 5 (a) 不同偏振态的飞秒激光聚焦到掺锗熔融石英内部时产生的各向异性散射^[51]; (b) 纳米光栅结构的扫描电子显微镜图^[52]; (c) 纳米光栅的场发射枪扫描电子显微镜(FEG-SEM)图,可以看到形成的纳米多孔层状结构^[53]; (d) 纳米光栅表现出双折射特性的示意图,纳米光栅可以简化为周期排布的折射率不同(n_1, n_2),厚度不同(t_1, t_2)的层状结构^[54]

Fig. 5 (a) Anisotropic scatterings produced by focusing femtosecond laser of different polarizations inside the germanium doped fused silica^[51]; (b) Scanning electron microscopy image of nanogratings structure^[52]; (c) FEG-SEM image of nanogratings^[53]; (d) Schematic diagram showing birefringence characteristics of nanogratings^[54]

度光存储^[55]。该存储技术还展现了可擦除重写^[56]、耐高温^[54]、耐磨、耐化学腐蚀的特性，十分适合数据的长寿命存储。该技术的超长存储寿命得益于熔融石英中纳米光栅的稳定性，Bricchi 等^[54]在高温条件下对熔融石英中纳米光栅双折射信号进行了热稳定性测试，结果表明，熔融石英中的纳米光栅结构热稳定性优异，在经过 200 °C 高温保存一小时后，纳米光栅的双折射信号仍为初始信号的 99.3%。而且经过高温处理后，两组不同双折射结构的光程延迟差值保持不变，这个特性意味着当存储介质经长期保存后，各光程延迟复用等级仍将保有极大的区分度。

有多个课题组在 2010 年前后对基于纳米光栅结构的多维光存储进行了研究^[55,57-58]，但这些工作仅仅停留在加工点阵、字母和图案上，并没有真正的数据被定性地写入。究其原因，传统的光强、光偏振调制手段较依赖于半波片旋转系统，调制时间慢，大幅降低了数据的写入速度。2014 年，张静宇等将一个无机械转动部件的激光调制系统应用到五维度光存储的写入装置中，该系统在原有激光直写系统基础上将写入速

度提升了两个数量级(图 6(a))^[23]。图 6(a)为基于纳米光栅的五维度光存储写入光路，通过在一个基于空间光调制器(SLM)和傅里叶镜片(FL)的 4-F 光束传输系统中引入一个半波片阵列(HPM)，从而利用调控全息图和样品移动来改变焦点处光斑的场强分布以及偏振分布。得益于写入速度的大幅提升，他们成功写入了一个 310 kB 大小的 PDF 文件，实现了单个数据点 3 bit 数据量的存储，并且完成了对该光存储使用寿命的测算。将纳米光栅双折射结构放入烤箱中恒温加热固定时间，根据双折射信号的衰减，利用阿伦尼乌斯方程可推算出该光存储在不同温度下的使用寿命，其在常温(303 K)下，有着 $3 \times 10^{20 \pm 1}$ 年的使用寿命，在 462 K 的高温下使用寿命也能达到 138 亿年，和已知的宇宙年龄相当，存储寿命近乎无限^[23]。如图 6(b)所示，数据的读取及解码过程也在该工作中进行了详细阐述，原始误码率为 0.36%。在解码后得到的数据中(图 6(c))不难发现，许多误码是重复出现的，这与写入时的激光偏振方向有关^[59]。该现象可用飞秒激光引入的脉冲前沿倾斜(pulse front tilt, PFT)机理来解释，Patel 等在

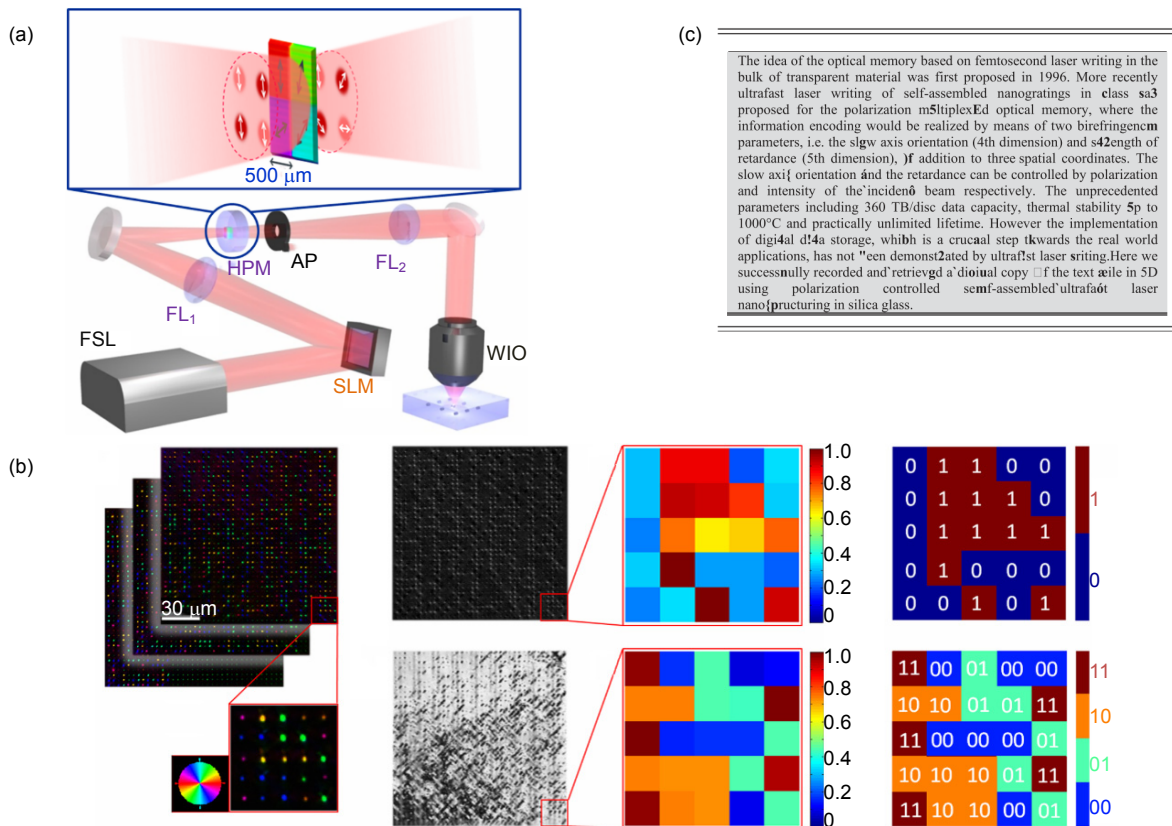


图 6 (a) 基于纳米光栅的五维度光存储写入系统; (b) 数据读取及解码示意图; (c) 存入、读取、并解码后的文字信息^[23]

Fig. 6 (a) Five-dimensional optical data storage recording setup; (b) Schematic diagram of the data readout process; (c) Decoded text information^[23]

2017 对这个现象做了具体阐述和定量分析^[60], 而张静宇等利用优化解码算法的方式降低了 PFT 对数据读取的影响, 将原始误码率降低到了 0.22%^[59]。

基于纳米光栅的五维度光存储容量巨大, 据推算, 单张 DVD 大小的五维光存储碟片可以存储最高 360 TB 的数据, 存储密度远超其它技术^[23,59], 有着广阔的应用前景。但此技术实用化的最大问题在于, 基于纳米光栅的双折射结构需要多个激光脉冲才能形成, 其中的解释原因多样, 并无定论^[53,61]。这个特性影响到该技术在光存储上的应用, 因为多脉冲数目意味着碟片必须在这段时间激光脉冲照射的时间内保持与物镜的相对静止, 否则得到的将不是一个完整的存储单元。而若将平台保持静止等待多个激光脉冲的入射, 又将大幅降低数据的写入速度, 且势必需引入复杂的机械系统。因此, 如何有效地降低引入双折射结构所需的脉冲数是近年来国内外研究的重点。其中, 2017 年俄罗斯的 Okhrimchuk 等实验发现利用飞秒激光突发模式 (burst mode) 形成一个间隔为 10 ps 的三脉冲序列可以在熔融石英中引入双折射结构, 但该双折射信号并不

来源于纳米光栅, 而是飞秒加工后产生的非对称性张应力(图 7(a))^[62]。到 2018 年, 由同一课题组的 Lipatiev 等利用纳米多孔玻璃实现了仅需要三个脉冲就产生的纳米光栅结构, 并成功检测出了双折射信号(图 7(b), 图 7(c))^[63]。这些新的发现, 和对纳米光栅结构的深入理解都将进一步推动其五维度光存储的实用化。

5 结 论

先进的存储技术将会极大地影响人类的生活, 多维度光存储、全息存储、DNA 存储^[64]和荧光纳米晶体存储技术^[40]等新型存储技术将在未来极大地满足人类的生产生活需要, 其中多维度光存储将在海量冷数据存储中占有极大优势。光存储技术的发展关乎到整个人类数字信息的传递和保存, 而维度复用技术的引入可以有效地提升现有光存储技术的容量。容量与复用维度数呈正相关, 但受限于材料对光不同参数的响应, 五维度复用仅在少数材料中得以实现。其中基于纳米光栅的五维度光存储技术表现出了卓越的性能: 大容量(单张碟片最高 360 TB)、长寿命(常温下近乎永久)、

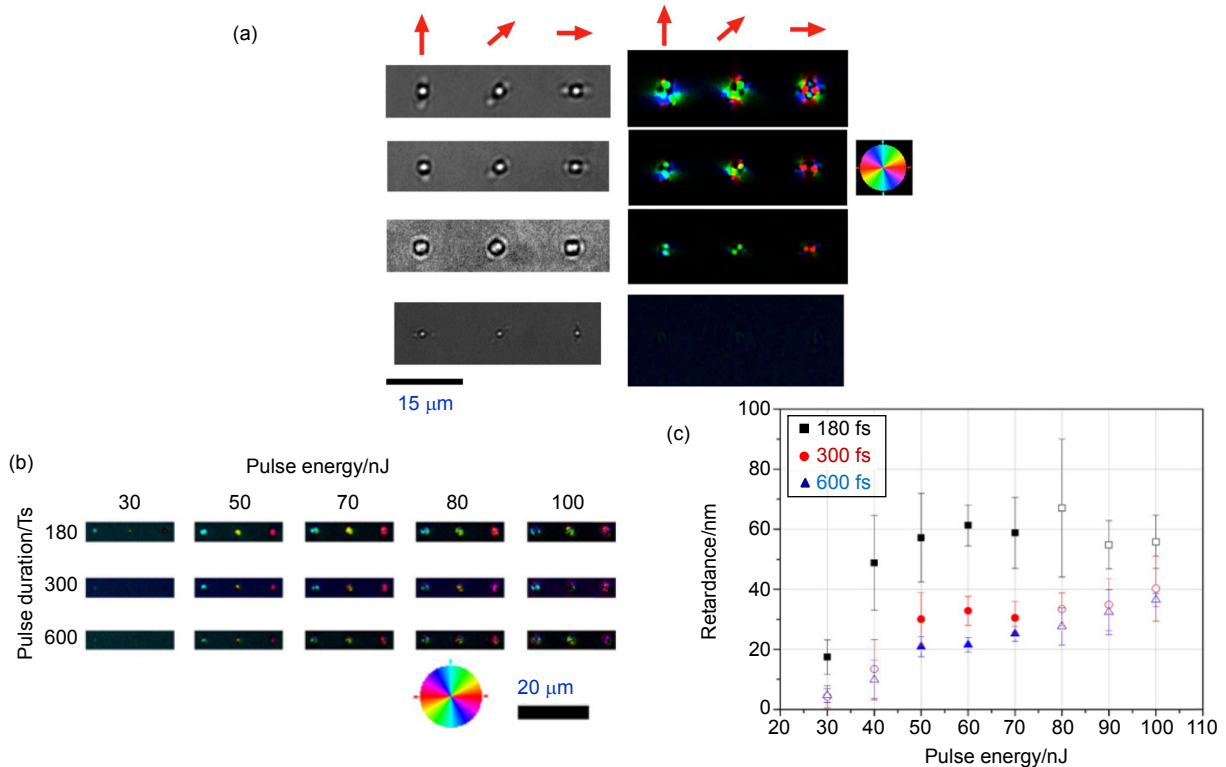


图 7 (a) 左侧和右侧分别为在熔融石英中, 不同结构在明场显微镜和双折射显微镜观察下的图片, 红色箭头代表偏振态^[62]; (b) 在纳米多孔玻璃中, 不同能量和脉宽情况下产生的结构在双折射显微镜观察下的图片; (c) 光程延迟值随激光能量和脉宽改变的关系图。其中激光脉冲数为 6 个, 重频为 200 kHz^[63]

Fig. 7 (a) Bright field and birefringence microscopic images of structures produced in fused silica by different burst energies and polarization directions, the red arrows indicate the polarization directions^[62]; (b) Slow axis orientation images of the laser-induced birefringent spots in nano-porous glass; (c) The plot of retardance vs pulse energy. The number of pulses is 6 and pulse repetition is 200 kHz^[63]

耐极端环境(耐 1000 °C 高温, 耐高压)等, 使其有望成为数据存储的终极解决方案。该技术获得了广泛认可, 2018 年 SpaceX 猎鹰重型运载火箭载着记录有艾萨克·阿西莫夫小说的纳米光栅五维度光存储碟片同特斯拉跑车一起飞向了火星, 而该碟片的另一拷贝由埃隆·马斯克个人收藏^[65]。但实用化该技术仍面临一些问题, 其中降低纳米光栅结构所需的脉冲个数为其中的重点和难点, 各课题组正通过激光调制、改变材料特性等方式试图解决。我们有理由相信, 在不远的未来, 大容量的多维度光存储技术能永久解决人类数据存储的难题。

参考文献

- [1] The digitization of the world from edge to core. Digest Version [EB/OL]. (2018-11). <https://www.seagate.com/cn/zh/our-story/data-age-2025>.
- [2] Delforge P. America's data centers consuming and wasting growing amounts of energy[EB/OL]. (2015-02-06). <https://www.nrdc.org/resources/americas-data-centers-consuming-and-wasting-growing-amounts-energy>.
- [3] Gantz J, Reinsel D. The digital universe in 2020: big data, bigger digital shadows, and biggest growth in the far east[EB/OL]. (2018-12). <https://www.emc.com/leadership/digital-universe/2012view/index.htm>.
- [4] 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.
- [5] Heanue J, Bashaw M, Hesselink L. Volume holographic storage and retrieval of digital data[J]. *Science*, 1994, **265**(5173): 749–752.
- [6] Parthenopoulos D A, Rentzepis P M. Three-dimensional optical storage memory[J]. *Science*, 1989, **245**(4920): 843–845.
- [7] Gan Z S, Cao Y Y, Evans R A, et al. Three-dimensional deep sub-diffraction optical beam lithography with 9 nm feature size[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 2061.
- [8] Gu H R, Zhao Z, Cao L C, et al. Multi-gray-level holographic storage using a binary spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2080–2083.
顾华荣, 赵瑛, 曹良才, 等. 用二值空间光调制器实现多灰阶全息存储[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2080–2083.
- [9] Hao M Z, Cao L C, He Q S, et al. High performance photopolymer recording materials for holographic storage[J]. *China Mediatech*, 2008(1): 60–64.
赫明钊, 曹良才, 何庆声, 等. 高性能光致聚合物材料与全息光存储[J]. *记录媒体技术*, 2008(1): 60–64.
- [10] Wang Y, Gu D H, Gan F X. Spectral and optical recording properties of a novel subphthalocyanine thin film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 948–951.
王阳, 顾冬红, 干福熹. 亚酞菁薄膜的光谱和光存储性质研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 948–951.
- [11] Gan F X, Wang Y. Breaking through the optical diffraction limits, developing the Nano-optics and photonics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900104.
干福熹, 王阳. 突破光学衍射极限, 发展纳米光学和光子学[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900104.
- [12] Zhai F X, Wang Y, Wu Y Q, et al. Optical properties of super-resolution near-field structure for optical Nano-storage[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(12): 28–35.
翟凤潇, 王阳, 吴谊群, 等. 纳米光存储薄膜结构的光学性质[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(12): 28–35.
- [13] Cao Q, Yan W R, Yao J, et al. Design and implementation of an ultra-large scale automatic optical disc library[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(9): 28–35.
曹强, 严文瑞, 姚杰, 等. 一种超大容量自动光盘库的设计与实现[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(9): 28–35.
- [14] Yan W R, Cao Q, Yao J, et al. A novel file system for large-scale optical library[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2015, **52**(S1): 1–8.
严文瑞, 曹强, 姚杰, 等. 一种面向大容量光盘库的新型文件系统[J]. *计算机研究与发展*, 2015, **52**(S1): 1–8.
- [15] Tang Y, Pei J, Pan L F, et al. Simulation analysis and experimental validation of a new multi-level read-only optical recording method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1353–1358.
唐毅, 裴京, 潘龙法, 等. 一种新的多阶只读光存储方法的仿真分析和实验验证[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1353–1358.
- [16] Tang Y, Pei J, Pan L F, et al. Adaptive level detection for multi-level optical disk using signal waveform modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1130–1134.
唐毅, 裴京, 潘龙法, 等. 波形调制多阶光盘的自适应阶次检测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1130–1134.
- [17] Li J H, Liu J P, Lin X, et al. Volume holographic data storage[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(10): 1000001.
李建华, 刘金鹏, 林泉, 等. 体全息存储研究现状及发展趋势[J]. *中国激光*, 2017, **44**(10): 1000001.
- [18] Wikipedia Contributors. Blu-ray[EB/OL]. (2019-02). <https://en.wikipedia.org/wiki/Blu-ray>.
- [19] Alasfar S, Ishikawa M, Kawata Y, et al. Polarization-multiplexed optical memory with urethane-urea copolymers[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(29): 6201–6204.
- [20] Ando E, Miyazaki J, Morimoto K, et al. J-aggregation of photochromic spiropyran in Langmuir-Blodgett films[J]. *Thin Solid Films*, 1985, **133**(1–4): 21–28.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Zhou Z Q, Hua Y L, Liu X, et al. Quantum storage of three-dimensional orbital-angular-momentum entanglement in a crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2015, **115**(7): 070502.
- [25] Gu M, Li X P. The road to multi-dimensional bit-by-bit optical data storage[J]. *Optics and Photonics News*, 2010, **21**(7): 28–33.
- [26] Hirshberg Y. Reversible formation and eradication of colors by irradiation at low temperatures. A photochemical memory model[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1956, **78**(10): 2304–2312.
- [27] Strickler J H, Webb W W. Three-dimensional optical data storage in refractive media by two-photon point excitation[J]. *Optics Letters*, 1991, **16**(22): 1780–1782.
- [28] Dvornikov A S, Rentzepis P M. Anthracene monomer-dimer photochemistry: High density 3D optical storage memory[J]. *Research on Chemical Intermediates*, 1996, **22**(2): 115–128.

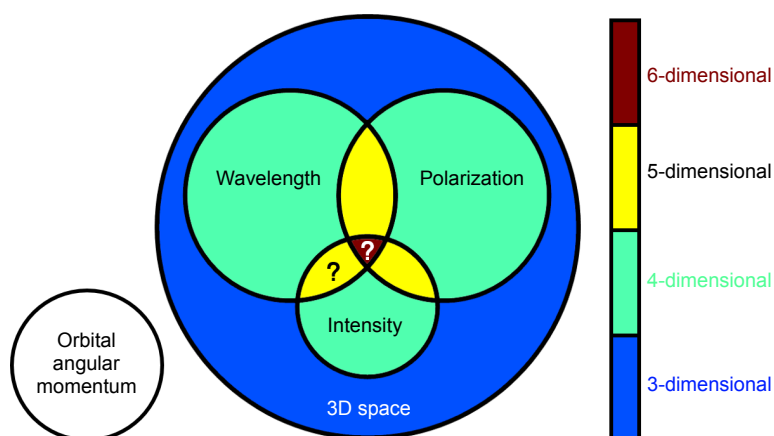
- [29] Yokoyama Y, Yamane T, Kurita Y. Photochromism of a protonated 5-dimethylaminoindolyfulgide: A model of a non-destructive readout for a photon mode optical memory[J]. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications*, 1991(24): 1722–1724.
- [30] Day D, Gu M, Smallridge A. Use of two-photon excitation for erasable–rewritable three-dimensional bit optical data storage in a photorefractive polymer[J]. *Optics Letters*, 1999, **24**(14): 948–950.
- [31] Cumpston B H, Ananthavel S P, Barlow S, *et al.* Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication[J]. *Nature*, 1999, **398**(6722): 51–54.
- [32] Kawata Y, Ishitobi H, Kawata S. Use of two-photon absorption in a photorefractive crystal for three-dimensional optical memory[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(10): 756–758.
- [33] Glezer E N, Milosavljevic M, Huang L, *et al.* Three-dimensional optical storage inside transparent materials[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(24): 2023–2025.
- [34] 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.
- [35] Kallepalli D L N, Alshehri A M, Marquez D T, *et al.* Ultra-high density optical data storage in common transparent plastics[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 26163.
- [36] Dvornikov A S, Walker E P, Rentzepis P M. Two-photon three-dimensional optical storage memory[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2009, **113**(49): 13633–13644.
- [37] Walker E, Rentzepis P M. Two-photon technology: A new dimension[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(7): 406–408.
- [38] Xu X H, Yu X, Wang T, *et al.* Rewritable LPL in Sm^{3+} -doped borate glass with the assistance of defects induced by femtosecond laser[J]. *Optical Materials Express*, 2016, **6**(2): 402–408.
- [39] Qiu J R, Miura K, Suzuki T, *et al.* Permanent photoreduction of Sm^{3+} to Sm^{2+} inside a sodium aluminoborate glass by an infrared femtosecond pulsed laser[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **74**(1): 10.
- [40] Riesen N, Pan X Z, Badek K, *et al.* Towards rewritable multilevel optical data storage in single nanocrystals[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(9): 12266–12276.
- [41] Hibino J, Moriyama K, Suzuki M A, *et al.* Aggregation control of photochromic spiropyrans in Langmuir-Blodgett films[J]. *Thin Solid Films*, 1992, **210–211**: 562–564.
- [42] Jensen T R, Malinsky M D, Haynes C L, *et al.* Nanosphere lithography: tunable localized surface plasmon resonance spectra of silver nanoparticles[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2000, **104**(45): 10549–10556.
- [43] Diltbacher H, Krenn J R, Lamprecht B, *et al.* Spectrally coded optical data storage by metal nanoparticles[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(8): 563–565.
- [44] Pham H H, Gourevich I, Oh J K, *et al.* A multilayer nanostructured material for optical data storage and security data encryption[J]. *Advanced Materials*, 2004, **16**(6): 516–520.
- [45] Li X P, Chon J W M, Wu S H, *et al.* Rewritable polarization-encoded multilayer data storage in 2,5-dimethyl-4-(*p*-nitrophenylazo)anisole doped polymer[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(3): 277–279.
- [46] Niidome Y, Urakawa S, Kawahara M, *et al.* Dichroism of poly(vinylalcohol) films containing gold nanorods induced by polarized pulsed-laser irradiation[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, **42**(4A): 1749–1750.
- [47] Li X P, Lan T H, Tien C H, *et al.* Three-dimensional orientation-unlimited polarization encryption by a single optically configured vectorial beam[J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 998.
- [48] Zhang Q M, Xia Z L, Cheng Y B, *et al.* High-capacity optical long data memory based on enhanced Young's modulus in nanoplasmonic hybrid glass composites[J]. *Nature Communications*, 2018, **9**: 1183.
- [49] Dai Q F, Ouyang M, Yuan W G, *et al.* Encoding random hot spots of a volume gold nanorod assembly for ultralow energy memory[J]. *Advanced Materials*, 2017, **29**(35): 1701918.
- [50] 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**(4–6): 279–284.
- [51] Kazansky P G, Inouye H, Mitsuyu T, *et al.* Anomalous anisotropic light scattering in Ge-doped silica glass[J]. *Physical Review Letters*, 1999, **82**(10): 2199–2202.
- [52] Shimotsuma 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.
- [53] Lancry M, Poumellec B, Canning J, *et al.* Ultrafast nanoporous silica formation driven by femtosecond laser irradiation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, **7**(6): 953–962.
- [54] Bricchi E, Kazansky P G. Extraordinary stability of anisotropic femtosecond direct-written structures embedded in silica glass[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(11): 111119.
- [55] Shimotsuma 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.
- [56] Taylor R S, Hnatovsky C, Simova E, *et al.* Femtosecond laser erasing and rewriting of self-organized planar nanocracks in fused silica glass[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(19): 2888–2890.
- [57] 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.
- [58] Hnatovsky C, Shvedov V G, Shostka N, *et al.* Polarization-dependent ablation of silicon using tightly focused femtosecond laser vortex pulses[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(2): 226–228.
- [59] Zhang J, Čerkauskaitė A, Drevinskas R, *et al.* Eternal 5D data storage by ultrafast laser writing in glass[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9736**: 97360U.
- [60] Patel A, Tikhonchuk V T, Zhang J Y, *et al.* Non-paraxial polarization spatio-temporal coupling in ultrafast laser material processing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, **11**(3): 1600290.
- [61] Richter S, Heinrich M, Döring S, *et al.* Nanogratings in fused silica: Formation, control, and applications[J]. *Journal of Laser Applications*, 2012, **24**(4): 042008.
- [62] Okhrimchuk A, Fedotov S, Glebov I, *et al.* Single shot laser writing with sub-nanosecond and nanosecond bursts of femtosecond pulses[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 16563.
- [63] Lipatiev A S, Fedotov S S, Okhrimchuk A G, *et al.* Multilevel data writing in nanoporous glass by a few femtosecond laser pulses[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(4): 978–982.
- [64] 周谷成, 范艳艳, 肖义军. DNA 存储技术的研究概述[J]. *生物学通报*, 2018, **53**(8): 10–12.
- [65] Wikipedia Contributors. 5D optical data storage[EB/OL]. (2019-02). https://en.wikipedia.org/wiki/5D_optical_data_storage.

Dimension expansion of high-capacity optical data storage

Chen Weiliang^{1,2}, Zhang Jingyu^{1,2*}

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

²Key Laboratory of Information Storage System Ministry of Education of China, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China



Dimension expansion of high-capacity optical data storage

Overview: Human beings are entering a big data era, which has significantly boosted the current digital economy and society. According to an estimation by the International Data Corporation (IDC), the information generated and consumed is nearly doubled every two year. Human being have already generated data onto an amount of 35 ZB (1 ZB=1000 EB=1000,000 PB=1000,000,000 TB=1000,000,000,000 GB) globally in 2017 and in the year of 2020 the total amount will reach 44 ZB. However, all current data storage technologies and mediums can only store less than half of this amount, which means most of the data will be forcibly lost if without breakthrough in high-capacity storage technologies. The infrastructure of the current information technology and the sustainability of the current information economy has been constantly challenged by the thirst for more storage capacities as well as low energy consumption. These challenges set a fundamental obstacle to the longevity and sustainability of the current information technology. Known for its green features, optical data storage is regarded as an excellent candidate for long-term data archiving. However, Ernst Abbe set a fundamental barrier that limits the smallest feature size of a recording cell to approximately half of the wavelength, leading to a capacity of hundreds of Gigabytes per disc. This capacity limitation could be overcome by implementing multiplex technology. This technology enables the potential for storing more than one bit of data in a single memory cell. It can be applied to materials which exhibit sensitivity to not only the intensity but also other parameters of light like polarization, wavelength, and fluorescence. Limited by the material response, only five multiplex dimensions have been achieved in gold nanorods embedded polymer and fused silica glass. The nanogratings, generated by femtosecond laser writing in fused silica, behave as a uniaxial optical crystal with negative birefringence. The two parameters of birefringence, the slow axis orientation and retardation can be independently controlled by the polarization and intensity of the incident laser beam. Thanks to the effect of multi-photon excitation, 3D space of the medium volume can be simultaneously utilized by focusing femtosecond laser in fused silica. Such memory, encoding data in 5 dimensions, is capable of recording 360 TB data per disc for billions of years. It is believed that 5D optical data storage based on nanogratings in fused silica opens a new era of eternal data storage.

Citation: Chen W L, Zhang J Y. Dimension expansion of high-capacity optical data storage[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(3): 180571

Supported by Wuhan National Laboratory for Optoelectronics Director Fund (61432007)

* E-mail: jy_z@hust.edu.cn