



DOI: 10.12086/oe.2019.180649

超分辨光存储研究进展

姜美玲, 张明偲, 李向平, 曹耀宇*

暨南大学光子技术研究院, 广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 510632

摘要: 随着大数据和人工智能等信息技术日新月异, 各行各业对数据信息存储的要求与日俱增。当前, 以磁控存储技术为主的信息存储方式普遍存在寿命低、能耗高的缺点。与磁存储技术相比, 光学数据存储技术具有能耗低、数据安全性高等优势, 然而其数据存储容量受到光学衍射极限的极大制约。如何突破光学衍射极限, 提升光存储技术光学系统的分辨能力, 从而增加光学存储系统数据存储容量, 是目前光存储技术进一步与大数据和云计算等信息技术融合的关键。本文阐述了基于超衍射极限分辨率的光学存储技术的原理和国内外发展现状, 包括远场超分辨的三维光存储(如基于双光子吸收过程和饱和受激发射损耗荧光过程光数据存储)和近场超分辨二维光存储(如近场探针扫描显微存储、近场固体浸没透镜存储和超分辨近场结构存储)。最后, 对基于超分辨光学存储技术当前存在的问题及未来发展方向进行了讨论。

关键词: 光数据存储技术; 光学超分辨技术; 超大容量数据存储

中图分类号: TP333; O436.3

文献标志码: A

引用格式: 姜美玲, 张明偲, 李向平, 等. 超分辨光存储研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(3): 180649

Research progress of super-resolution optical data storage

Jiang Meiling, Zhang Mingsi, Li Xiangping, Cao Yaoyu*

Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract: With the rapid development of Big Data and artificial intelligence, emerging information technology compels dramatically increasing demands on data information storage. At present, conventional magnetization-based information storage methods generally suffer from technique challenges raised by short lifetime and high energy consumption. Optical data storage technology, in comparison, is well known for its advantages of low energy consumption and high security. However, the disc capacity of optical data storage technology inevitably gets stuck in the physical fundamental barrier-optical diffraction limit. How to break optical diffraction barrier and improve the resolution of optical storage system, thereby increasing the data storage capacity of the optical storage system is the key to incorporating optical storage technology with information technology trend such as big data and cloud computing. In this review, we present the principle of optical storage techniques beyond diffraction-limited and recent progress in high capacity optical data storage, including far field super-resolution three dimensional (3D) storage techniques (such as two-photon absorption-based process and saturation stimulated emission depletion fluorescence-inspired approaches) and near field super-resolution two dimensional (2D) optical storage techniques (such as near field scanning probe methods, solid immersion lens approaches, and super-resolution near-field structure

收稿日期: 2018-12-10; 收到修改稿日期: 2019-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(61605061, 61875073); 广东省自然科学基金(2016A030313088); 广东省创新创业项目(2016ZT06D081)

作者简介: 姜美玲(1987-), 女, 博士, 研究员, 主要从事微纳加工方面的研究。E-mail: jiangmeiling@126.com

通信作者: 曹耀宇(1981-), 男, 博士, 研究员, 主要从事超分辨光学技术与应用的研究。E-mail: yaoyucao@jnu.edu.cn

methods). Eventually, the here-and-now problems confronted by the super-resolution optical data storage and future development of optical storage technology towards ultra-high capacity optical disc based on optical super-resolution techniques are discussed.

Keywords: optical data storage technology; optical super-resolution technology; ultra-high capacity optical data storage

Citation: Jiang M L, Zhang M S, Li X P, *et al.* Research progress of super-resolution optical data storage[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(3): 180649

1 引 用

人类社会发展到以大数据、人工智能、神经网络、深度学习为代表的数字信息技术时代, 智能手机、物联网、生物遗传数据、大气、地理信息等各个领域的数据信息存储已经成为人类生活不可或缺的一部分。根据国际数据公司(International Data Corporation, IDC)在 2017 年统计报告, 预计到 2025 年, 全球生成的数据总量将达到 163 ZB(1 ZB=10³ EB=10⁶ PB=10⁹ TB), 但受信息存储技术的限制, 能被存储的数据总量将不超过 10%。

当前, 数据存储和归档方法主要依赖于磁控存储技术, 如硬盘驱动器(hard disk drive, HDD)和磁带。为了存储由客户机生成的大量信息, 全世界已经构建了由数千个硬盘阵列组成的数据中心。然而, 这一技术的可持续性面临几个关键问题。首先硬盘单盘容量小于 10 TB(10⁴ GB), 远远低于未来信息存储的要求。其次, 基于硬盘的数据中心能耗巨大, 仅美国数据中心一年耗电量就达到 900 亿千瓦时(相当于 1 个三峡水电站年发电量)。数据存储能源需求与供给之间的鸿沟与日俱增。面对新兴信息技术的突飞猛进, 迫切需要发展一种具有 PB 级容量、超低能耗和超长寿命的数据存储技术。

商用光学数据存储(optical data storage, ODS)首先在 20 世纪 80 年代以光盘的形式呈现。与传统的磁存储技术相比, 光盘存储技术具有存储容量高、能源消耗低等优点。然而, 目前的数字型多用途存储光盘(digital versatile disk, DVD)和蓝光光盘等光学存储方式, 一方面受光学衍射极限的限制, 数据存储面密度有限; 另一方面受光学三维空间分辨率限制, 只能实现单层信息存储。因此, 一般光盘的存储容量往往都小于几十 GB^[1], 蓝光光盘的存储容量能达到 100 GB, 这都极大限制了光存储技术在新兴信息技术中的应用。虽然大量的研究证明, 通过脉冲激光束的非线性激发, 能进一步提高新型非线性介质的光盘存储密度

和容量^[2-4]。然而, 在光学衍射极限的限制下, 一张普通光盘的理论存储容量也只能达到几个 TB^[5-6], 远远不能满足现代通信网络中对海量数据信息存储的需求。

如何将单张光盘的存储容量, 从 GB 数量级提高到 TB 甚至 PB 数量级, 是实现其在新兴信息技术应用中的关键。近年来, 得益于纳米技术的快速发展, 纳米光子学在纳米尺度下研究光与物质相互作用的领域的研究领域取得了长足进步, 使光波能够更好地控制纳米尺度上的材料性质。基于纳米光子学理论和技术, 出现了负折射率材料^[7-8]、纳米光学电路^[9-10]、纳米发射源^[11-12]、超衍射极限成像^[13-15]以及超分辨光刻^[16-17]等一系列新技术方向和技术手段。这些研究为突破光学衍射限制、实现基于纳米光子技术大容量光存储铺平了道路。

不考虑编码等影响因素, 提高光存储系统容量的研究主要围绕两个方面展开, 包括多维度信息复用技术和深亚波长光学超分辨技术。信息复用技术主要利用多物理维度增加单位空间信息存储密度, 以及实现空间上三维立体数据存储。而深亚波长光学超分辨技术可以根据不同的技术原理, 按照存储位点与存储镜头物镜距离的远近分为远场和近场两种情况, 分别提升光学系统的三维空间和二维平面分辨率, 从而实现更高密度的数据存储。

本文将对基于提升光学系统分辨能力的光学存储技术进行系统介绍, 并总结其最新研究成果。首先, 将介绍基于远场可超越光学衍射极限的双光子吸收(two-photon absorption, TPA)三维光存储和基于远场超分辨受激发射损耗(stimulated emission depletion, STED)荧光显微三维光存储技术; 其次, 将介绍基于近场超越光学衍射极限光学存储, 包括近场探针扫描显微(scanning probe microscopy, SPM)存储、近场固体浸没透镜(solid immersion lens, SIL)存储和超分辨近场结构(super-resolution near-field structure, super-RENS)存储, 如图 1 所示(表格中为各存储技术

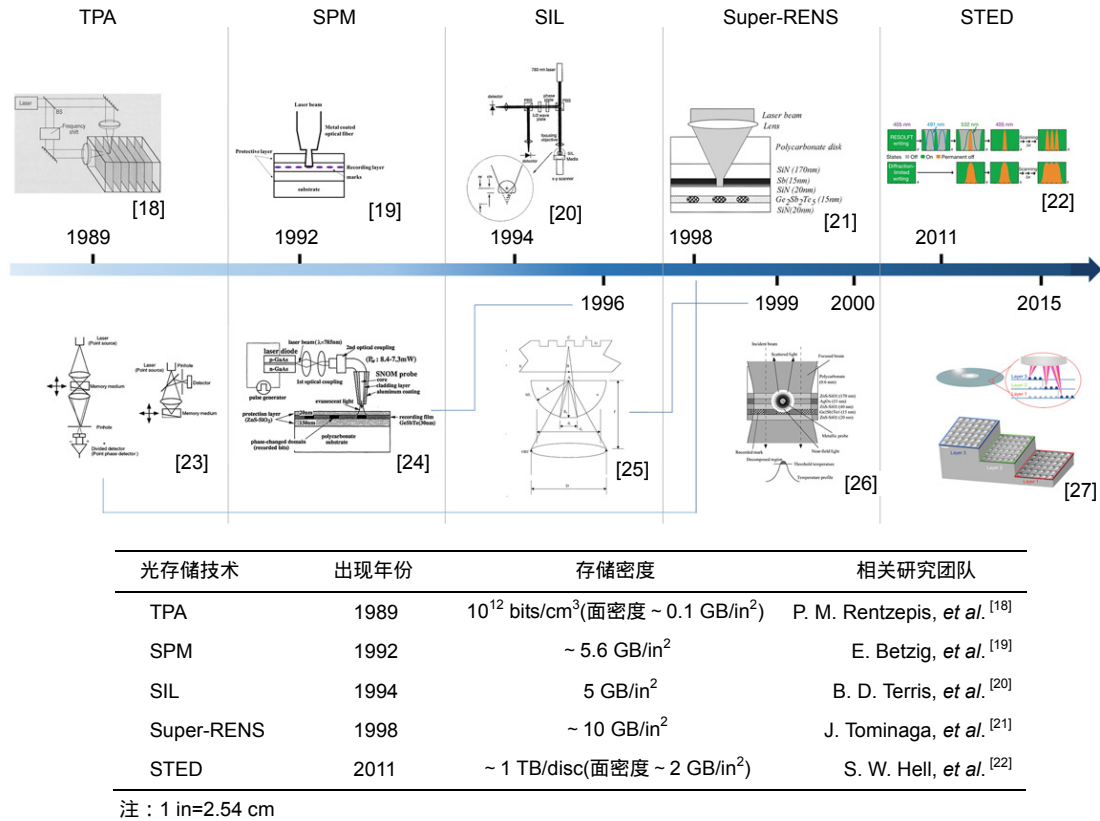


图 1 超分辨光信息存储技术进展

Fig. 1 Progress of super resolution optical data storage techniques

出现的年份及当时所能到达的数据存储密度)。最后,对基于超分辨的光学存储技术存在的问题及未来发展方向进行了展望。

2 通过远场超越光学衍射极限实现的高密度光存储

由于存在光学衍射极限,光存储技术所采用的光学系统的分辨率大约为半个波长尺寸。为实现更高密度的光数据存储,传统方法是缩短激光头所采用的激光波长和提高聚焦透镜数值孔径。然而,激光波长和透镜数值孔径已到达相关技术瓶颈,如蓝光存储采用 405 nm 激光,而数值孔径已达到 0.85。此外,采用更短波长激光光源需要更复杂的光学系统、昂贵的光学元件和开发新材料等,使光存储成本极速增加。因此,为满足低成本、高效率、高密度的光存储需求,研究和发 展远场激光超衍射光存储技术具有十分重要的科学意义和应用价值。衍射极限的本质来源于量子力学中的测不准原理带来的光波信息中代表细节的高频信息缺失,表现为光斑脉冲信号具有较大的半高宽分布。

远场超越光学衍射极限分辨技术,是基于点扩散函数调制,真正从源头上减小了聚焦光斑图像在远场空间的半高宽分布,从而实现远场超越光学衍射分辨率。目前,主流的通过远场光学超衍射实现高密度光存储的途径主要有如下两种:1) 基于双光子吸收(TPA)的光存储;2) 基于远场超分辨受激发射损耗(STED)荧光显微原理光存储。

2.1 双光子吸收三维光存储

通常聚焦激光焦斑的光强分布采用高斯型,居中心区域光强高,即光子密度高。利用双光子吸收原理,可将材料与激光之间发生的双光子吸收作用限制在聚焦点的中心三维高光强区,其尺寸小于聚焦光斑直径。双光子吸收过程理论最早由德国物理学家 Mayer 在 1931 年提出,揭示了介质在受到强光激发条件下,基态电子会同时吸收两个光子而跃迁到激发态,即发生双光子吸收现象,光子跃迁速度与光强的平方成正比。因此,可利用超快激光(如飞秒、皮秒激光)瞬态超高峰值功率特性,通过存储介质与飞秒激光束的双光子吸收作用,实现光信息在三维空间的存储。当一定频

率和强度的激光作用在存储介质上时,存储介质中部分基态分子同时吸收两个光子,分子结构产生变化,导致存储介质产生如光致色变作用、光聚合、光致荧光效应、光折变效应等光学性质的变化,这些变化都可以用作信息的记录和读出。

传统的单光子吸收(single-photon absorption, SPA)是线性过程,在光照下,介质材料只需要吸收一个光子就可以实现从基态到激发态的跃迁,而双光子吸收是三阶非线性过程^[28],根据非线性光学理论,介质发生双光子吸收的概率不仅与介质的非线性系数有关,还与激光光束的能量密度有关,即引发双光子吸收的激光阈值。根据材料的非线性光学特性,通过控制激光强度,可以得到小于聚焦光斑大小的双光子吸收范围,实现高密度光存储。图 2 是单光子和双光子吸收的能量图和使用双光子吸收的光数据存储的示意图。

1989 年,美国科学家 Rentzepis 教授提出并开发了基于双光子吸收的三维并行光存储设备,将光致变色材料嵌入聚合物矩阵,实现信息的写入、读取和擦除^[18]。该设备数据存储体密度可以达到 10^{12} bits/cm³。1999 年, Pudavar 等人运用聚合物掺杂高效双光子吸收剂产生上转换,在高强度光激发下,双光子诱导光致化学反应将记录区域的吸收和荧光转移到更长的波长,可以使用红外脉冲激光下的双光子激发模式或连续激光下的单光子激发模式进行信号读取,如图 3 所示^[29]。这种方法实现的多层高密度光信息存储光盘,存储层间距是 10 μ m,存储密度预计也可以达到 10^{12} bits/cm³。图 3(a)是采用单光子吸收和双光子吸收两种

读取机制读取的多层存储信息的对比。图 3(b)是为了准确估计实验条件下的轴向分辨率,对存储区域进行 X-Z 扫描,并将荧光强度变化绘制成样品深度的函数。这两种读取机制的横向分辨率都可以达到 1 μ m(单光子模式下使用共聚焦显微镜)。

1998 年,澳大利亚顾敏研究组研究了双光子漂白聚合物中记录材料与浸没介质折射率不匹配引起的球差对三维光信息存储密度的影响。理论和实验两方面发现,在记录和读取过程中,改变显微镜物镜管长度可以补偿折射率不匹配产生的球差,提高了双光子吸收三维光存储的轴向分辨率^[23]。2005 年, Zhou 等人利用共聚焦荧光显微镜与三维光存储系统结合,在一种新的双光子激发光致变色材料中,实现了三维高密度光存储^[30]。通过优化 PMMA 薄膜中光致变色材料的掺杂浓度、读取信号的激光功率和激光在每个数据位的停留时间,得到记录信息点间距为 4 μ m、层间距为 9 μ m 的三维信息存储。2015 年, Cai 等人利用飞秒脉冲激光,在掺杂纳米银颗粒聚合物中实现了 11 层三维光信息存储,信息记录点的间距为 2 μ m、层间距为 14 μ m^[31]。

双光子吸收三维光存储技术是利用聚合物材料在激光作用下产生电子跃迁,使材料的物理或化学性质发生变化实现的光存储技术,存储材料的响应时间可达到皮秒量级。但是一般聚合物材料的双光子吸收截面很小,限制了该技术的实际应用。可通过开发大双光子吸收截面的有机聚合物材料,促使双光子吸收三维光存储技术走向实用化。

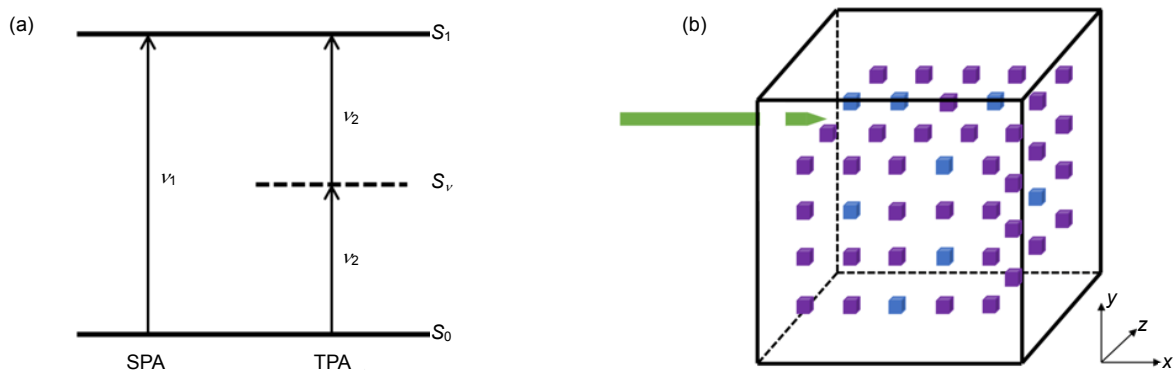


图 2 (a) 单光子和双光子吸收过程对应的能级跃迁图; (b) 使用双光子吸收的三维光数据存储示意图
 Fig. 2 (a) Energy diagram for single-photon and two-photon absorption; (b) Schematic drawing of 3-dimensional optical memory using two-photon absorption

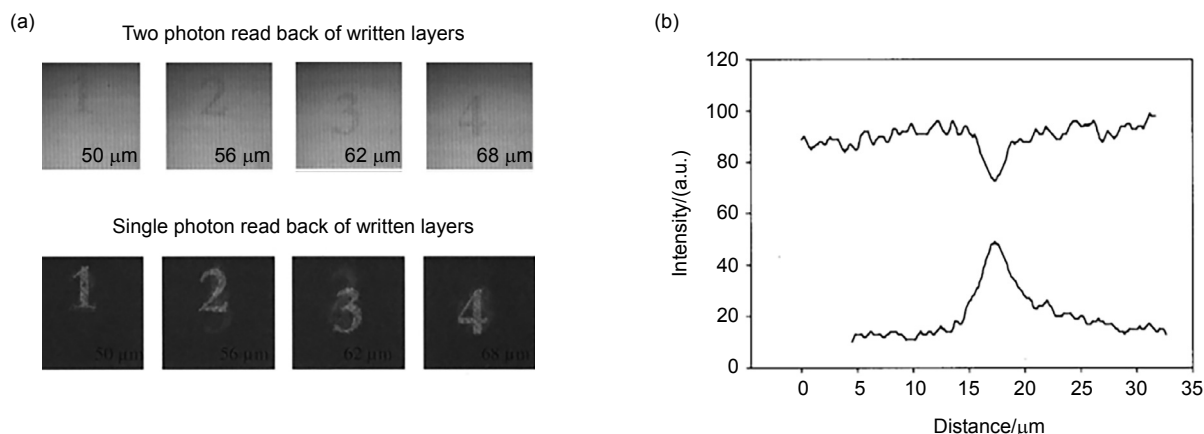


图 3 (a) 单光子吸收和双光子吸收读取机制读出多层存储信息的对比; (b) 用共聚焦显微镜测量记录点 X-Z 扫描剖面的荧光强度^[29]

Fig. 3 (a) Two-photon and single-photon read back of multiple layers information recording written at an even spacing of 6 μm apart; (b) Fluorescence intensity measured using X-Z scan profile of a written spot using confocal microscope, plotted against depth (up) in two-photon read back and (down) in single-photon read back^[29]

2.2 超分辨受激发射损耗饱和荧光纳米显微原理光存储

1994 年,德国科学家 Hell 在研究远场显微镜成像时,提出了受激发射损耗(STED)荧光显微技术^[32]。该技术最显著的特点是用两束光代替一束光完成材料的光激发控制。在激发光的光激发作用下,利用另一束光,通过其诱导的受激辐射损耗过程,实现对光激发区域荧光信号的空间调制,并成功地突破了光学衍射极限的限制。如图 4 所示,受 STED 荧光纳米显微镜超分辨原理启发,在激光加工技术中,使用一束高斯型的激发光束引发光聚合加工(initiation focus),同时

引入特殊焦斑形状(“甜甜圈”形)的抑制光束(inhibition distribution),使抑制光束曝光区域内的激发分子在抑制光的作用下,通过光抑制过程重新回落到稳定态,最终可将发生光聚合的区域限定在更小的局部区域范围内(effective focus),使加工分辨率突破光学衍射极限。双光束超分辨加工技术成为利用可见光实现三维纳米加工的重要途径^[33],进一步启发其在光存储中的应用。在光数据存储设备中引入双光束光学系统,利用双光束超分辨技术,可通过改变激发光束与抑制光束的光强比,将记录过程限制在激发光束中心,使信息记录点的尺寸缩小至纳米量级,从而在光存储介质上实现高密度光存储。

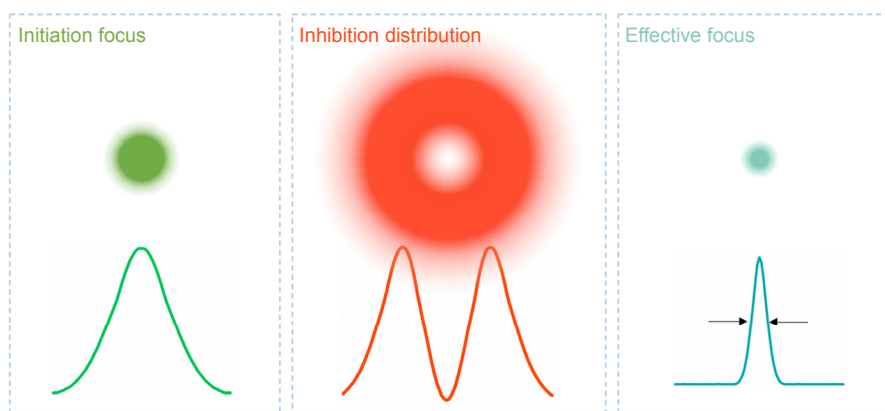


图 4 双光束超分辨加工原理图

Fig. 4 Schematic diagram of dual-beam super-resolution fabrication

鉴于双光束激光直写加工在突破光学衍射极限上的巨大潜力，国内外研发团队针对该技术做了大量研究工作，在加工材料、加工技术和工艺方面取得了重要的突破和进展。2009年，美国马里兰大学 Fourkas 研究组利用 800 nm 脉冲激光双光子聚合，同时利用 800 nm 连续激光引起聚合反应中间态光失活抑制光聚合反应，得到轴向最小特征尺寸是 40 nm 的聚合物线^[34]。2013年，澳大利亚顾敏研究组用 800 nm 飞秒激光作为激发光源，375 nm 连续光作为抑制光，在新型树脂中实现双线横向分辨率 52 nm 的纳米线和最小特征尺寸为 9 nm 的悬空线^[35]。2017年，德国 Wollhofen 研究组利用 780 nm 的飞秒激光和 532 nm 的损耗光，在新型功能性光刻胶材料上，实现最小横向特征尺寸为 50 nm ~ 60 nm，轴向线分辨率为 130 nm 的结构^[36]。

基于双光束的超分辨激光加工技术可以实现十纳米量级的特征尺寸，以及多焦点阵列加工特点，满足光数据存储领域对超高容量和超快数据存储的迫切需要。2011年，德国 Grotjohann 等人利用一种新型荧光蛋白，称为可逆切换增强绿色荧光蛋白 (reversibly switchable enhanced green fluorescent protein, rsEGFP)^[22]，结合双光束超分辨技术(如图 5 所示)，完成了亚波长尺度数据记录，记录点之间的距离是 200 nm，存储面密度约为 20 Gbits/in²，单光盘容量有望达

到 TB 量级。

2015年，李向平、曹耀宇等人运用双光束超分辨技术实现超大容量的光存储，如图 6 所示。该研究组将 800 nm 飞秒超快光源作为记录光束，375 nm 连续激光作为抑制光束，在玻璃基板上实现了最小 33 nm 的记录点，与目前蓝光存储技术单点信息记录尺寸 300 nm 相比，可将单光盘单面信息记录密度提高 100 倍，存储面密度可以达到 574 Gbits/in²。再结合飞秒激光光源的三维位元数据记录能力，可进一步将单光盘容量提升到 30 TB^[27,37]。

基于受激发射损耗饱和和荧光纳米显微原理可以实现十纳米量级的记录特征尺寸，是目前可以实现的存储密度最高的光存储技术。进一步需要开发研制适用于双光束存储的介质材料，克服多层存储中光的透过率降低等问题，提高该存储技术的存储密度和存储容量。

3 基于倏逝波的近场超分辨光存储

近场，通常指距离样品表面数十纳米的电磁场。近场光学的信息存储是利用介质与光源小于半波长的距离内获得的倏逝波来实现，倏逝波具有非传输、衰减快的性质。通过近场超分辨实现高密度光存储，就是通过亚波长尺寸的光学探头和亚波长尺寸的距离控

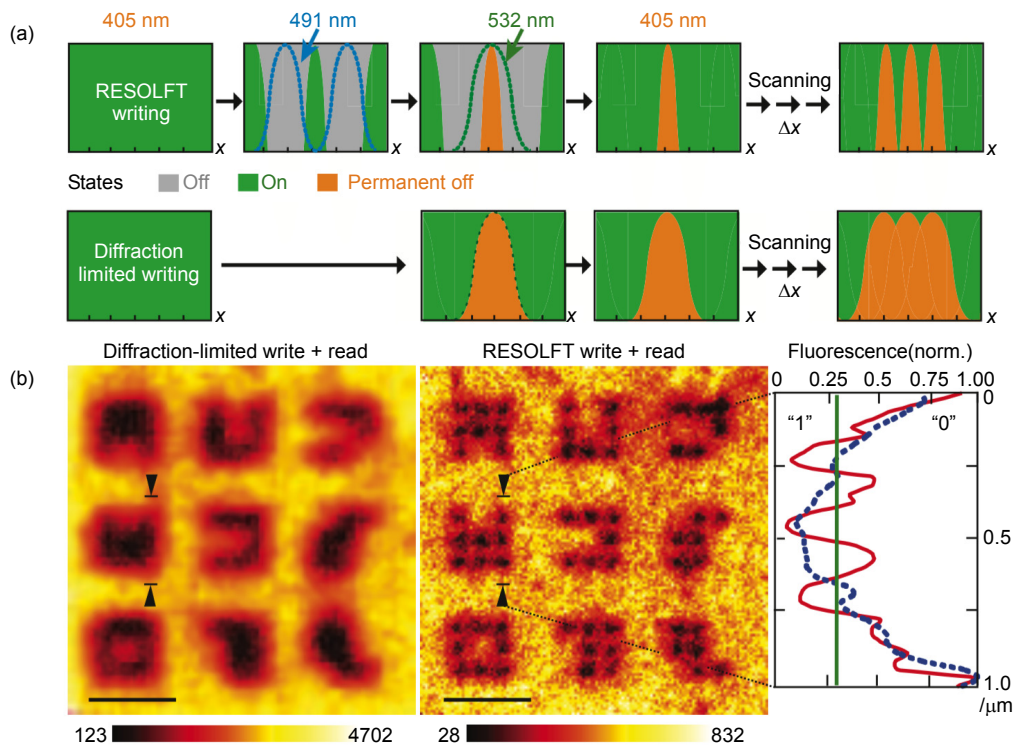


图 5 利用 rsEGFP 和可见光实现亚衍射分辨率读写^[22]

Fig. 5 Sub-diffraction resolution writing and reading using rsEGFP and visible light^[22]

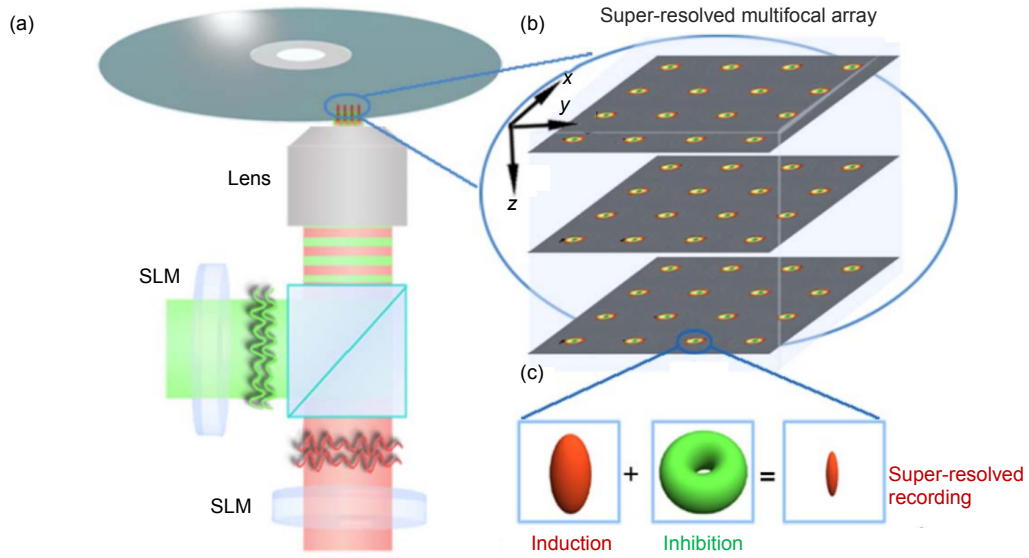


图 6 超高容量和超快光记录的平行纳米光刻^[27]

Fig. 6 Parallelized nanoscopy for ultrahigh capacity and ultrafast optical recording^[27]

制，实现亚波长尺寸的光学记录，提高光数据存储的面密度。因此，只需要将光学存储介质放置在近场光学的显微系统中，并始终保持光学探头和存储介质的距离在近场范围内，就可以在存储介质中形成亚波长数量级的记录点阵，从而克服光学衍射极限，实现高密度光存储。目前，通过近场超分辨实现高密度光存储的途径主要分为三种：1) 探针扫描显微(SPM)存储；2) 近场固体浸没透镜(SIL)存储；3) 超分辨近场结构(super-RENS)存储。这三种方法都是通过不同方式缩小记录光斑尺寸来提高光存储密度。

3.1 近场探针扫描显微光存储

近场探针扫描显微存储技术，是基于扫描近场显微镜技术发展起来的一种超分辨存储方法。该技术通过利用倏逝波的空间高频震荡突破传统光学系统衍射极限的限制，结构示意图如图 7 所示。近场探针扫描显微存储技术用一根光纤作为光波导，光纤顶部是尺寸更小的锥形光学探针。当光学探针头与记录介质层表面的距离小于二分之一波长时，会有极其明显的近场光学效应，从而在记录层获得尺寸更小的记录光斑。

1992 年，贝尔实验室的 Betzig 等人首次将近场光学显微镜用于磁光薄膜材料磁畴的记录，该方法采用波长 515 nm 的 Ar 激光作为光源，在记录材料上获得了特征尺寸是 60 nm 的数据记录点，存储面密度可达到 45 Gbits/in²^[19]。1996 年，Hosaka 等人采用波长 785

nm 的激光在相变材料上获得了特征尺寸是 60 nm 的记录光斑，存储面密度达到 170 Gbits/in²^[24]。近场探针扫描显微技术可以实现高密度光存储，但同时也存在着一些问题：光纤探针尖端孔径是纳米尺度，使得光能量透过率很小，读写信号弱，信噪比差，而且光探针容易损坏，受到污染；光纤探针与记录介质表面的距离只有 20 nm 左右的空气层，很难精确控制它们之间的距离。这些技术上的困难限制了近场探针扫描显微技术在光数据存储方面的发展和商业化^[38]。针对上述问题，1999 年，贝尔实验室 Partovi 等人改用直径为 250 nm 的小孔径激光作为光源，在极大提高通光效

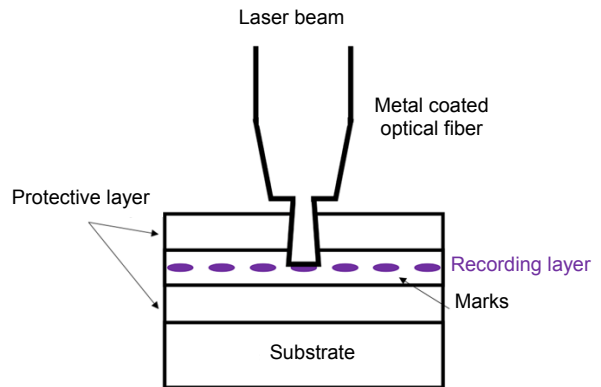


图 7 近场探针扫描显微存储技术原理图

Fig. 7 Schematic diagram of SPM

率的同时,获得了特征尺寸是 250 nm 的记录点,存储面密度可达到 7.5 Gbits/in²[39]。2001 年, Gorecki 等人利用在垂直谐振腔表面发出激光(vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL)与微探针结合作为光源,获得了直径是 200 nm 的记录光斑,存储面密度可达 ~12 Gbits/in²[40]。这种集成新型探针不仅可以获得更小的光斑尺寸,而且结构简单,通光效率高。2017 年, Sharma 和 Pankaj 等人利用特殊设计的纳米结构电极和扫描探针技术,设计了可扩展到 100 nm 以下的非易失性铁电畴壁存储器的理论模型。该装置在中等电压 (<3 V)下可以无损读出,具有高达 1000 左右的通断比,具有良好的耐久性、鲁棒性和多级数据存储能力[41]。

3.2 近场固体浸没透镜光存储

光盘的存储密度始终受到光学系统分辨本领的限制,提高光学系统的分辨率主要通过缩短激光波长和增大物镜的数值孔径来获得更小的光斑尺寸。固体浸没透镜技术就是一种能够有效增加物镜的实际有效数值孔径的途径,具有输出功率高、存储速度快等优点。如图 8 所示,固体浸没透镜技术是在光学物镜前端,增加了一个半球形的固体浸没透镜,从而使入射光束在较大折射率的固体浸没透镜中汇聚形成更小的光斑。假设固体浸没透镜的折射率为 n ,理论上,采用这种技术后,光斑尺寸减小为光波真空尺寸的 $1/n^2$,即存储密度可以提高 n^2 倍。1994 年, Terris 等人首次将固体浸没透镜应用于光存储,使用波长为 780 nm 的激光光源,获得了尺寸大小为 317 nm 的数据记录点。

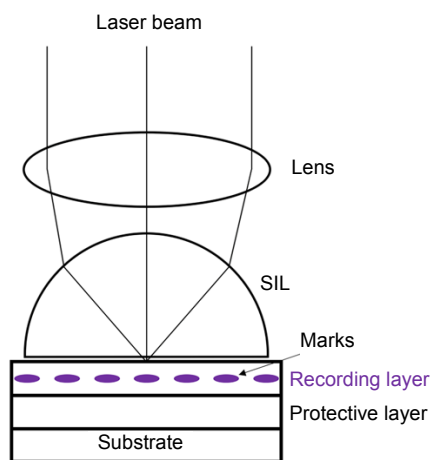


图 8 固体浸没透镜技术和光盘结构示意图
Fig. 8 Schematic diagram of SIL and disk structure

如果采用蓝光光源,聚焦光斑尺寸可以达到 125 nm,光存储面密度为 40 Gbits/in²,有效数值孔径可以达到 1.83[20,42]。1999 年, Huang 等人采用双域固体浸没透镜实现近场光存储,激光透过双域固体浸没透镜后在轴向上产生记录光斑和寻址光斑,可以同时光盘底面记录层完成记录和光盘预刻槽表层完成寻址[25]。

2006 年, Shinoda 等人用化学气相沉积法合成的金刚石,在 405 nm 波长下的折射率为 2.458,而且宽波长范围内具有高透射率,用来设计高数值孔径的固体浸没透镜,可以实现 150 GB 的存储容量,存储面密度可以达到 104.3 Gbit/in²[43]。2016 年,复旦大学武利民研究组提出了一种新的纳米固体流体组装方法(nano-solid-fluid assembly, NSFA),使用高折射率、深亚波长尺寸的 TiO₂ 纳米颗粒(15 nm, 折射率 $n=2.55$)作为构建模块,来制造一种用于可见光频率的三维全介电超材料。由于其光学高透明性、高折射率和深亚波长结构,用这种三维全介电超材料作为固体浸没透镜,利用白光照明,可在光学显微镜下产生 45 nm 的超分辨率清晰图像,明显超过了经典的衍射极限和以往的近场成像技术[44]。该技术在固体浸没透镜存储技术上有着巨大的潜在应用。

固体浸没透镜技术通过提高数值孔径达到提高光存储分辨率的目的,但是,增大数值孔径是以焦深的减小和失真的加大为代价,而且包含固体浸没透镜的光学探头,同样存在制作困难、有效数值孔径不能无限增加等弱点,所以利用固体浸没透镜技术记录光斑的尺寸在实质上还是受到光学衍射极限的制约,存储密度提高有限。

3.3 超分辨近场结构光存储

超分辨近场结构(Super-RENS)存储是人们提出的另一种近场光存储技术,这种技术可以有效地克服探针扫描显微、近场固体浸没透镜等光存储技术的一些不足(如镜头设计加工复杂、镜头与记录介质表面距离难以精确控制等问题),实现超高密度光存储。与传统光盘的简单结构相比,超分辨近场结构光存储的光盘盘片在两层保护层之间增加了一层掩膜层。利用掩膜层材料在强光作用下的非线性效应或表面等离子体场增强效应,实现亚波长尺寸的光学存储。目前组成掩膜层的材料主要有三种,包括相变材料、金属氧化物及半导体材料。在激光的照射下,掩膜层中会形成微小孔径或者发生其它物理变化。对应于不同的掩膜层材料,其超分辨存储的机理也不尽相同。但是大量的

实验结果验证了它们具有一个相同点,那就是掩膜层在激光光束的作用下发生非线性光学效应,使激光光斑尺寸透过掩膜层后急剧减小,在记录介质上实现高密度光存储。超分辨近场结构光存储技术被视为最有希望实现商业化的技术之一。

1998年,Tominaga等人首次提出了孔型超分辨近场结构的光盘结构。该光盘以相变介质 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 作为记录层材料,以金属 Sb 为超分辨掩膜层(简称掩膜层),以 SiN 材料作为上下电介质保护层,其基本结构如图 9 所示^[21]。当聚焦的高斯分布的激光入射到金属 Sb 层上时,Sb 的非线性响应导致在样品近场区域内形成亚波长尺寸透明小孔,透过小孔在记录层材料上形成超衍射极限的光斑。而后,移除激光束,Sb 材料又立即恢复到它原始的状态,完成近场记录过程。使用波长为 686 nm,物镜数值孔径为 0.6 的光存储系统下,该存储结构可以实现特征尺寸为 90 nm 的记录点阵,光存储面密度约为 80 Gbits/in²,突破了衍射极限。超分辨近场透镜技术最突出的优点是探针与记录层之间是介电薄膜,通过溅射或其他真空技术可以精确控制薄膜的厚度,从而巧妙地解决了伺服控制问题。

2001年,Lu等人用 Sb_2Te_3 作为掩膜层制作了超分辨近场光盘结构,解决了由于 Sb 热稳定性差而影响读出信号的问题。2010年,Nakai等人用半导体材料 InSb 作为超分辨近场光盘的掩膜层,将记录光斑的特征尺寸减小到 80 nm,一个五层结构的 ROM 光盘存储容量可以达到 46 GB^[45]。研究证明,在读取超过 4×10^5

次之后,光盘读取数据能力基本保持稳定。

Tominaga 等人在 2000 年又提出了用 AgO_x 薄膜为掩膜层的散射中心型超分辨近场结构^[26]。图 10 是用 AgO_x 薄膜作为掩膜层的超分辨近场结构光盘的截面图,保护层为 ZnS-SiO₂。他们等人认为^[46],这个结构的原理是利用在激光照射下 AgO_x 分解得到的 Ag 金属纳米颗粒的散射,而非掩膜层的透过率孔径,实现了近场光信息存储。 AgO_x 薄膜用以制造金属探针,通过光化学或热化学反应分解出纳米尺寸的 Ag 颗粒和氧气,Ag 金属纳米颗粒即为近场光的光源。在激光照射下,Ag 纳米颗粒激发局域表面等离子体共振,产生局域场增强。基于散射中心型超分辨近场结构的光盘可以实现 6 m/s 的记录速度,数据记录点尺寸可以小于 100 nm。当数据存储过程结束之后,Ag 纳米颗粒又可以和 O₂ 分子再次化合,重新生成 AgO_x 。

Fu 等人开发 Au-SiO₂ 纳米复合薄膜材料用作超分辨近场结构存储技术光盘的新型掩膜层^[47],研究发现,平均直径为 5 nm 的 Au 纳米颗粒可以极大地增强光透射率(135%)。研究者认为,导致这些结果的关键因素是激发 Au 纳米颗粒的局域表面等离子体共振效应以及纳米颗粒之间的强耦合。Zhao 等人采用磁控溅射共溅的方式制备了 Ag 掺杂一定量 Si 的复合薄膜,可以实现超衍射分辨的记录和读出^[48]。超分辨光盘的读出信号信噪比最高为 28 dB,光盘可持续读取数据 10 万次条件下,保持信号强度不变。

光散射中心型超分辨近场结构存储技术具有非常

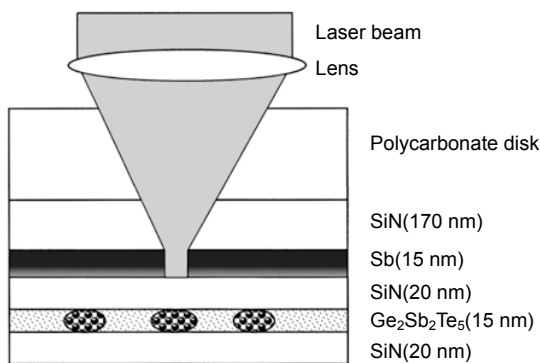


图 9 超分辨近场结构的盘片结构^[21]

Fig. 9 Schematic diagram of super-RENS disk structure^[21]

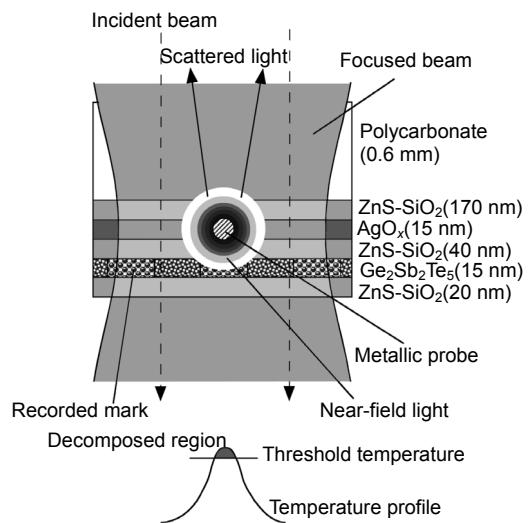


图 10 AgO_x 超分辨近场结构磁盘的截面图^[26]

Fig. 10 Cross section of AgO_x super-RENS disk^[26]

高的光学分辨率。然而,在光存储过程中,AgO_x需要发生化学反应,同时材料会发生相应形变,而且AgO_x的形变温度较低,导致在光存储过程中材料化学和物理性质都不稳定,不宜用作存档数据存储。2012年发展的Ag-Si纳米复合材料和银纳米颗粒嵌入型材料,可克服上述材料问题,为实现长时间光存储提供了新方法。

超分辨近场结构技术通过设计合适的薄膜结构和使用非线性特性材料来减小光斑尺寸,突破衍射极限,实现高密度光数据存储。该技术在过去二十年的研究中取得了很大的进展,它与当前的光学技术可以很好的兼容,具有较好的操作性和可应用性。然而,该技术还受到尚待解决的问题的困扰,例如复杂的薄膜结构带来的制作工艺问题,高于传统光盘的读取数据能耗问题等缺陷,都限制了该技术的实际应用。因此,进一步推动该技术需要开发合适的掩模层材料、优化薄膜结构来进一步提高超分辨近场结构光存储技术的存储稳定性和数据写入/读取速度^[49]。

4 总结与展望

随着各种超分辨技术的不断发展,基于超分辨的光学存储技术也在不断完善、日趋成熟。光学数据存储技术的理论存储密度不断扩大,使其具备能够克服其他数据存储方式,如磁控存储技术的高能耗和低寿命等缺点,在大数据存储技术中具有广泛的应用前景。目前,商用光存储系统还是以二维数据存储技术为主,提升数据存储容量的技术开发工作主要围绕提高数据存储面密度展开,如何开发并提升信息存储的体密度仍然有巨大的研究和商业化空间。通过开发三维光存储技术,进一步实现立体空间的光学超分辨,将对于提升现有光学存储技术的信息存储密度产生巨大影响,单光盘数据存储容量可获得几何级倍数的提升。同时,伴随基于新原理的超分辨光学技术发展,如基于超震荡透镜和超临界透镜等超分辨技术等纯光学的远场技术,具有不需要倏逝场的参与、也无需借助材料的非线性响应等优点,为克服超分辨光存储中面临的技术问题提供新的解决方法,有希望在高密度光存储领域中展现其重要应用价值^[50]。同时,超分辨光学存储技术还可以与光信息复用技术结合,实现三维空间维度与频率、偏振、角动量等物理维度光信息存储技术融合,最终实现高维度复合光学存储技术,这种利用五维、六维乃至更高理论维度空间的光存储技术,不仅对进一步提升光存储容量铺平了道路,而且为信

息读写物理加密和光信息存算一体化开启了大门,将成为未来光学存储技术的主要发展方向之一。

参考文献

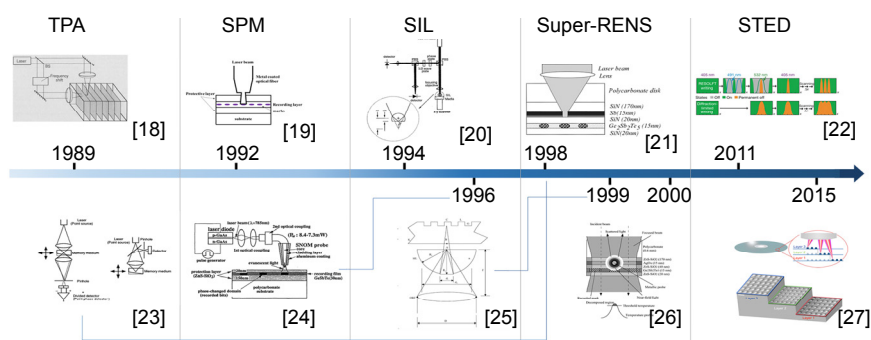
- [1] Gu M, Li X P. The road to multi-dimensional bit-by-bit optical data storage[J]. *Optics and Photonics News*, 2010, **21**(7): 28–33.
- [2] Strickler J H, Webb W W. Three-dimensional optical data storage in refractive media by two-photon point excitation[J]. *Optics Letters*, 1991, **16**(22):1780.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Day D, Gu M. Effects of refractive-index mismatch on three-dimensional optical data-storage density in a two-photon bleaching polymer[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(26): 6299–6304.
- [6] 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.
- [7] Shalaev V M. Optical negative-index metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2007(1): 41–48.
- [8] Chen J B, Wang Y, Jia B H, et al. Observation of the inverse Doppler effect in negative-index materials at optical frequencies[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(4): 239–245.
- [9] Chow E, Lin S Y, Johnson S G, et al. Three-dimensional control of light in a two-dimensional photonic crystal slab[J]. *Nature*, 2000, **407**(6807): 983–986.
- [10] Almeida V R, Barrios C A, Panepucci R R, et al. All-optical control of light on a silicon chip[J]. *Nature*, 2004, **431**(7012): 1081–1084.
- [11] Noda S, Fujita M, Asano T. Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(8): 449–458.
- [12] Li J, Jia B, Zhou G, et al. Spectral redistribution in spontaneous emission from quantum-dot-infiltrated 3D woodpile photonic crystals for telecommunications[J]. *Advanced Materials*, 2010, **19**(20): 3276–3280.
- [13] Rittweger E, Han K Y, Irvine S E, et al. STED microscopy reveals crystal colour centres with nanometric resolution[J]. *Nature Photonics*, 2015, **3**(3): 144–147.
- [14] Rust M J, Bates M, Zhuang X W. Sub-diffraction-limit imaging by stochastic optical reconstruction microscopy (STORM)[J]. *Nature Methods*, 2010, **3**(10): 793–795.
- [15] Gu M, Cao Y Y, Castelletto S, et al. Super-resolving single nitrogen vacancy centers within single nanodiamonds using a localization microscope[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(15): 17639–17646.
- [16] Fischer J, von Freymann G, Wegener M. The materials challenge in diffraction-unlimited direct-laser-writing optical lithography[J]. *Advanced Materials*, 2010, **22**(32): 3578–3582.
- [17] Li L J, Gattass R R, Gershgoren E, et al. Achieving $\lambda/20$ resolution by one-color initiation and deactivation of polymerization[J]. *Science*, 2009, **324**(5929): 910–913.
- [18] Parthenopoulos D A, Rentzepis P M. Three-dimensional optical storage memory[J]. *Science*, 1989, **245**(4920): 843–845.

- [19] Betzig E, Trautman J K, Wolfe R, *et al.* Near-field magneto-optics and high density data storage[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, **61**(2): 142–144.
- [20] Terris B D, Mamin H J, Rugar D, *et al.* Near-field optical data storage using a solid immersion lens[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, **65**(4): 388–390.
- [21] Tominaga J, Nakano T, Atoda N. An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, **73**(15): 2078–2080.
- [22] Grotjohann T, Testa I, Leutenegger M, *et al.* Diffraction-unlimited all-optical imaging and writing with a photochromic GFP[J]. *Nature*, 2011, **478**(7368): 204–208.
- [23] Toriumi A, Kawata S, Gu M. Reflection confocal microscope readout system for three-dimensional photochromic optical data storage[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(24): 1924–1926.
- [24] Hosaka S, Shintani T, Miyamoto M, *et al.* Nanometer-sized phase-change recording using a scanning near-field optical microscope with a laser diode[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1996, **35**(1B): 443–447.
- [25] Huang D R, Chao Z W, Wu G Z, *et al.* Near-field recording head with simple tracking design[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, **38**(3B): 1774–1776.
- [26] Fuji H, Tominaga J, Men L Q, *et al.* A near-field recording and readout technology using a metallic probe in an optical disk[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, **39**(2B): 980–981.
- [27] Li X P, Cao Y Y, Tian N, *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.
- [28] Boyd R W. *Nonlinear optics-handbook of laser technology and applications*[M]. Philadelphia: Taylor & Francis, 2003: 161.
- [29] Pudavar H E, Joshi M P, Prasad P N, *et al.* High-density three-dimensional optical data storage in a stacked compact disk format with two-photon writing and single photon readout[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **74**(9): 1338–1340.
- [30] Zhou Y J, Tang H H, Zhuang W H, *et al.* Three-dimensional optical data storage in a novel photochromic material with two-photon writing and one-photon readout[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(3): 035202.
- [31] Cai J W, Huang W H. Three-dimensional information storage of polymer doped with nano-silver[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2015, **57**(11): 2662–2665.
- [32] Hell S W, Wichmann J. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy[J]. *Optics Letters*, 1994, **19**(11): 780–782.
- [33] Cao Y Y, Xie F, Zhang P D, *et al.* Dual-beam super-resolution direct laser writing nanofabrication technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(12): 1133–1145.
曹耀宇, 谢飞, 张鹏达, 等. 双光束超分辨激光直写纳米加工技术[J]. *光电工程*, 2017, **44**(12): 1133–1145.
- [34] Scott T F, Kowalski B A, Sullivan A C, *et al.* Two-color single-photon photoinitiation and photoinhibition for subdiffraction photolithography[J]. *Science*, 2009, **324**(5929): 913–917.
- [35] 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.
- [36] Wollhofen R, Buchegger B, Eder C, *et al.* Functional photoresists for sub-diffraction stimulated emission depletion lithography[J]. *Optical Materials Express*, 2017, **7**(7): 2538–2559.
- [37] 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.
- [38] Li X, Pan S, Xing L W. Development of ultra-high density optical storage technology[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2007, **26**(1): 78–83.
李鑫, 潘石, 邢立伟. 超高密度光存储技术的进展[J]. *电子显微学报*, 2007, **26**(1): 78–83.
- [39] Partovi A, Peale D, Wuttig M, *et al.* High-power laser light source for near-field optics and its application to high-density optical data storage[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **75**(11): 1515–1517.
- [40] Gorecki C, Khalfallah S, Kawakatsu H, *et al.* New SNOM sensor using optical feedback in a VCSEL-based compound-cavity[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, **87**(3): 113–123.
- [41] Sharma P, Zhang Q, Sando D, *et al.* Nonvolatile ferroelectric domain wall memory[J]. *Science Advances*, 2017, **3**(6): e1700512.
- [42] Terris B D, Mamin H J, Rugar D. Near-field optical data storage[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, **68**(2): 141–143.
- [43] Shinoda M, Saito K, Kondo T, *et al.* High-density near-field readout using a diamond solid immersion lens[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, **45**(2B): 1311–1313.
- [44] Fan W, Yan B, Wang Z D, *et al.* Three-dimensional all-dielectric metamaterial solid immersion lens for subwavelength imaging at visible frequencies[J]. *Science Advances*, 2016, **2**(8): e1600901.
- [45] Nakai K, Ohmaki M, Takeshita N, *et al.* Bit-error-rate evaluation of super-resolution near-field structure read-only memory discs with semiconductive material InSb[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, **49**(8S2): 08KE01.
- [46] Tominaga J, Kim J, Fuji H, *et al.* Super-resolution near-field structure and signal enhancement by surface plasmons[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, **40**(3B): 1831–1834.
- [47] Fu Y H, Ho F H, Hsu W C, *et al.* Nonlinear optical properties of the Au-SiO₂ nanocomposite superresolution near-field thin film[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, **43**(7B): 5020–5023.
- [48] Zhao S L, Geng Y Y, Shi H R. Study on super-resolution readout performance of Si-Doped Ag film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 297–302.
赵石磊, 耿永友, 施宏仁. Si掺杂Ag基超分辨薄膜读出性能研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 297–302.
- [49] Zhang K, Geng Y Y, Wang Y, *et al.* Progress of super-resolution near-field structure and its application in optical data storage[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2014, **7**(4): 475–485.
- [50] Qin F, Li X P, Hong M H. From super-oscillatory lens to super-critical lens: surpassing the diffraction limit via light field modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(8): 757–771.
秦飞, 李向平, 洪明辉. 从超振荡透镜到超临界透镜: 超越衍射极限的光场调制[J]. *光电工程*, 2017, **44**(8): 757–771.

Research progress of super-resolution optical data storage

Jiang Meiling, Zhang Mingsi, Li Xiangping, Cao Yaoyu*

Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China



Progress of super resolution optical data storage techniques

Overview: With the rapid development of Big Data and artificial intelligence, emerging information technologies such as Smartphone, Internet of Things, Biogenetic Data, Atmosphere, and Geographic Information compel dramatically increasing demands on extremely high information storage capacity and speed. At present, data storage and archiving methods mainly rely on conventional magnetization-based information storage method which generally suffers from technique challenges raised by short lifetime and high energy consumption. Optical data storage technology, in comparison, is well known for its advantages of high storage capacity, low energy consumption, and high security. However, the disc capacity of optical data storage technology inevitably gets stuck in the physical fundamental barrier-optical diffraction limit. The diffraction limit of light is substantially introduced by the lack of spatial frequencies higher than that can be supported by certain light wave and optical system. As a consequence, light spot cannot be infinitely squeezed down to a mathematically ideal point, giving rise to limited density and capacity of optical data storage. How to crash through optical diffraction barrier and improve resolution of optical storage system, thereby increasing the data storage capacity of the optical storage system is the key to incorporating optical storage technology with information technology trend such as big data and cloud computing. In this review, we have introduced the principle of contemporary optical storage techniques capable of storing and retrieving data in a manner of being beyond the diffraction-limit and recent progress in ultra-high capacity optical data storage techniques, including far field super-resolution three dimensional (3D) optical storage techniques and near field super-resolution two dimensional (2D) optical storage techniques. The far field super-resolution is the technique can reduce the full width at half maximum (FWHM) of the intensity distribution of the focused spot in the far field. The main techniques of far field super-resolution optical storage are based on nonlinear interaction between light and recording medium, such as two-photon absorption-based process and saturation stimulated emission depletion fluorescence-inspired approaches. The near field super-resolution is the technique that mainly utilize the evanescent wave within the sub-wavelength distance between the light source and the recording medium. The main techniques of near field super-resolution optical storage involve near field scanning probe methods, solid immersion lens approaches, and super-resolution near-field structure methods. Eventually, the here-and-now problems confronted by the super-resolution optical data storage and future development of optical storage technology towards ultra-high capacity optical disc based on optical super-resolution techniques are discussed.

Citation: Jiang M L, Zhang M S, Li X P, *et al.* Research progress of super-resolution optical data storage[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(3): 180649

Supported by National Natural Science Foundation of China (61605061, 61875073), the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (2016A030313088), and Guangdong Provincial Innovation and Entrepreneurship Project (2016ZT06D081)

* E-mail: yaoyucaojnu.edu.cn