



DOI: 10.12086/oe.2019.180559

面向产业化应用的双光束超分辨数据存储技术

骆志军¹, 刘亚男¹, 陈梦林¹, 邓琳¹, 甘棕松^{1,2,3*}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;³深圳华中科技大学研究院, 广东 深圳 518057

摘要: 光学数据存储技术虽然在存储寿命和功耗上具有显著优势,但在应对大数据纵深发展趋势时,目前的一些光存储技术在容量和密度方面面临严峻的挑战。相比于其他光存储技术,双光束超分辨光学数据存储技术在光学大数据存储产业化方面展现了明显的容量和密度优势。本文针对双光束超分辨光存储技术,全面介绍了该技术在光存储技术产业化应用中亟待解决的核心关键问题,并着重讨论了解决这些问题所需要采用的基本方法。

关键词: 光存储; 双光束超分辨光存储; 超高密度; 超分辨伺服定位

中图分类号: TP334.5; O439

文献标志码: A

引用格式: 骆志军, 刘亚男, 陈梦林, 等. 面向产业化应用的双光束超分辨数据存储技术[J]. 光电工程, 2019, 46(3): 180559

Industrialization oriented technology of dual-beam super-resolution data storage

Luo Zhijun¹, Liu Yanan¹, Chen Menglin¹, Deng Lin¹, Gan Zongsong^{1,2,3*}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;³Shenzhen Huazhong University of Science and Technology Research Institute, Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract: Though optical data storage technology has attractive potential because of its long storage lifetime and low energy consumption, current optical data storage technologies are challenged by their capacity and density for big data application. Dual-beam super-resolution optical data storage technology exhibits obvious advantage in ultra-high capacity and density due to the overcoming of optical diffraction limit. This work illuminates the key problems in the industrialization of dual-beam super-resolution optical data storage technology, and discusses some basic solutions to these obstacles.

Keywords: optical data storage; dual-beam super-resolution; ultra-high density; super-resolution positioning

Citation: Luo Z J, Liu Y N, Chen M L, *et al.* Industrialization oriented technology of dual-beam super-resolution data storage[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(3): 180559

收稿日期: 2018-10-31; 收到修改稿日期: 2018-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61775068, 61432007)

作者简介: 骆志军(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事双光束超分辨光存储的研究。E-mail: zjluo_opt@126.com

通信作者: 甘棕松(1985-), 男, 博士, 教授, 主要从事超衍射极限精密光学技术及其在信息技术中的应用。

E-mail: ganzongsong@hust.edu.cn

1 引言

光学数据存储因为其超低存储能耗以及超长使用寿命,成为下一代大数据中心存储硬件方案的潜在选择。目前商用光盘库主流产品是基于蓝光光盘和蓝光光驱的集成系统,所用光盘单片容量在 50 GB~200 GB,单库容量在几十 TB 到一 PB 之间。在电子数据总量急剧加速增长的形势下,如何进一步增大光盘库的存储容量成为当前光学数据存储技术面向产业化发展的首要难题。一方面,光盘库扩容因为没有增加数据存储密度而面临应用成本大幅度上升的困难;另一方面,因为光学衍射极限的存在,传统光盘容量提升所采取的缩短所用半导体激光波长和增大光学系统聚焦物镜数值孔径方法,已达到产业化的极限。波长和数值孔径所带来的微小提升并不能带来光盘容量的显著增长。双光束超分辨光存储技术通过突破光学衍射极限,被普遍认为可以大幅度提高光存储密度和容量。如能够实现存储密度两个数量级以上的提升,则结合光盘阵列技术,有望实现 EB 甚至 ZB 级容量的光子大数据中心存储,为信息技术的可持续性发展提供核心关键基础硬件。

与传统光盘采用烧孔及反射式的读写形式不同,双光束超分辨光存储技术利用荧光材料的受激辐射损耗原理来实现密度超越远场光学衍射极限的数据读写。该技术是在单束激光聚焦于存储介质上实现数据读写的基础上,引入另一束聚焦光斑中心光强为零的抑制激光,抑制光与原读写光对存储材料的作用相反。在数据写入的过程中,写入激光诱导存储介质发生性能改变从而实现数据记录,而抑制光阻止写入激光导致的存储介质性能发生改变^[1];在数据读出过程中,读出激光辐照数据记录点,诱导数据记录点辐射出荧光信号,而抑制光抑制数据记录点在读出激光辐照下辐射荧光信号,降低目标荧光信号强度^[2]。通过将两束光的聚焦中心在空间上,重合抑制光就能够抑制两束光重叠区域读写光束对材料的影响,进而导致原读写光束对存储材料的有效作用区域显著减小,进而实现超越光学衍射极限效果的数据存储。

双光束超分辨光存储技术因为具有突破衍射极限的数据存储能力,因而得到了学术界和产业界的广泛关注和重视。国内外均先后开展了对该技术的学术和工程研究,然而到目前为止,该技术在产业化应用中仍然存在若干亟待解决的核心关键问题。本文将介绍这些核心关键问题,提出并讨论解决这些问题所需要

采用的基本方法,为该技术最终产业化提供可供参考的思路和想法。

2 国内外研究现状

双光束超分辨数据存储技术综合了双光束超分辨激光制造技术和双光束超分辨显微成像技术,以分别实现光学超分辨数据的写入和读出。在双光束超分辨激光制造方面,2009年马里兰大学 Li 等人利用单波长连续及脉冲激光分别对聚合物实现引发聚合和阻止聚合的不同作用,最终获得了 100 nm 的特征线宽^[3]。随后基于光致变色^[4],光阻聚^[5-6],光化学^[7],光致发光^[8],光吸收率^[9]以及受激发射损耗^[10]等物理或化学的方法,多种双光束激光制造技术的研究均实现了超分辨的特征线宽。上海光机所刘铁诚等基于二芳基乙烯的光学测试,理论计算得到二芳基乙烯材料具有 60 nm 的光学数据写入分辨率^[11]。目前基于双光子吸收材料聚合物的双光束超分辨激光制造技术的特征尺寸达到 9 nm^[11],特征线间距(特征分辨率)约为 50 nm。在双光束超分辨显微成像技术方面,以 Hell 为代表的研究人员已经将基于荧光标记物的成像分辨率推进到 20 nm 以下^[2,12]。然而,要实现双光束超分辨数据存储,就必须在存储介质中同时实现双光束超分辨数据写入和成像读出。这使得目前能够支持双光束超分辨数据读写的材料的种类和个数受到极大限制。Hell 提出了利用开关荧光蛋白与可聚合光致变色材料应用到光存储介质^[13-14]。2016年斯威本科技大学甘棕松等人展示了可以同时实现超分辨写入及超分辨荧光读出的复合存储材料^[15]。国内目前尚无关于此类材料的报道。

3 双光束超分辨光存储技术面向产业化应用的关键问题

3.1 技术背景

双光束超分辨光存储技术是受激辐射损耗荧光显微术(stimulated emission depletion microscopy, STED)和超分辨激光制造技术在存储介质上的结合。受激辐射损耗荧光显微术是德国科学家 Hell 于 1994 年提出^[16],该技术突破了荧光显微成像技术中的分辨率衍射极限。该技术主要基于对处于激发态能级上的荧光材料布局数进行调控,来实现荧光显微成像的超分辨效果。该技术利用两束激光,第一束激发光在焦平面聚焦点点状光斑,用来对荧光物质进行激励,使其从基态跃迁到激发态。在自发辐射的情况下,荧光物质会

从激发态跃迁回基态，并辐射出波长为 λ_0 光子。第二束激光起损耗作用，其波长比荧光物质自发辐射光的波长略长，在第一束激发光聚焦的焦平面处聚焦成一个中心强度为零的甜甜圈环状光斑，其中心与激发光聚焦光斑中心重合。当两束光同时辐照荧光物质时，该损耗光能够使荧光物质处于激发态的电子受激辐射到一个比基态稍高的能级上，辐射出一个与损耗光波长 λ_1 相同的光子，该电子再经过无辐射弛豫回到基态，其电子跃迁如图 1(a)所示。两束光聚焦光斑重叠的地方，荧光材料波长为 λ_0 的荧光辐射会随着损耗光光强增大而降低。这使得在保证激发光聚焦光斑中心处荧光光强不变的情况下，荧光材料在激发光作用下荧光强度分布的半高宽会显著缩窄，因而提高基于荧光强度分布测量的成像分辨率，如图 1(b)和图 1(c)所示。STED 成像技术能够达到的荧光成像分辨率和所用双束激光的波长无关，而只与两束激光的强度，以及材料的自身性能如吸收阈值等相关。该技术没有理论上的成像分辨率极限，然而材料的损伤阈值等自身特性会限制实际成像分辨率。

三维激光直写制造技术普遍应用于有机聚合物结构和器件的微纳加工，其加工过程同样受光学衍射极限的影响，也同样存在着减小加工特征尺寸，提高特征分辨率的需要。最初人们在聚合物单体材料中掺入光引发剂来实现多光子吸收，减少激光聚焦光斑对材料的作用体积。但是这种方法的分辨率提高是有限的，

分辨率提高的倍数大致与材料 n 光子吸收的 \sqrt{n} 成正比^[17]。之后激光直写制造技术借鉴了 STED 成像技术，利用双光束提高分辨率的思路发展出一种超分辨率引发抑制纳米光刻技术 (super resolution photoinduction-inhibition nanolithography, SPIN)^[5]，并在聚合物单体材料中再添加一种或多种抑制材料，该抑制材料能够在第二束聚焦环形抑制光的辐照下分解，其分解产物的产量受环形抑制光光强及曝光时间影响，产物能够抑制聚合物单体的聚合反应。两束光同时作用聚合物单体材料时，第一束激发光诱发单体聚合，第二束环形抑制光抑制聚合，这样就只有两束光聚焦光斑的中心区域发生聚合，因而能够实现超分辨的写入效果，SPIN 直写如图 1(d)所示。如果能够在一种固体材料上先实现双光束超分辨点状结构写入，使得在第一束写入光的作用下该固体材料荧光性能发生改变的区域尺寸大小小于光的衍射极限经典尺寸，则就实现了在该固体材料上的双光束超分辨数据写入。所写入的数据类似于光盘中的二元比特数据，此时数据写入的密度将大幅度提高。理论上分辨率提高 m 倍，则光盘单层容量提高 m^2 倍。与普通激光直写技术不同，数据存储技术要求对所写入的数据进行读出，因此需要在实现了双光束超分辨数据写入的固体材料上，运用双光束超分辨成像技术实现数据读出。这要求原固体材料在双光束超分辨数据写入且材料荧光性能发生改变后，其改变后的荧光性能能够支持类似于受激辐射损耗的

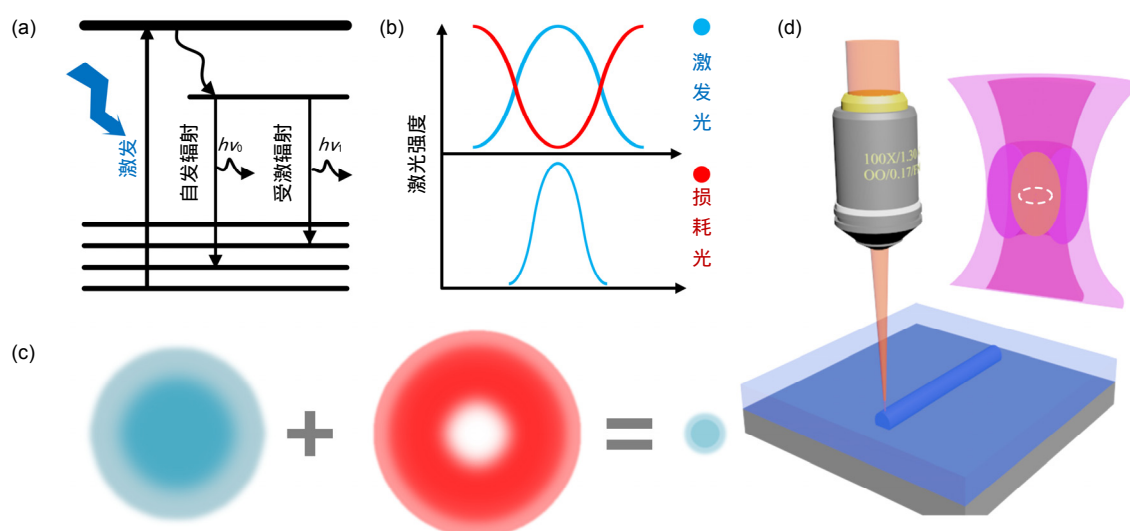


图 1 受激发射损耗荧光显微术的原理。(a) 电子跃迁示意图; (b) 激发光与损耗光在聚焦光斑中心处重合及有效光强分布; (c) 焦平面光斑示意图; (d) SPIN 激光纳米直写制造技术

Fig. 1 Schematic of stimulated emission depletion microscopy. (a) Electronic transition; (b) Intensity overlap of dual-beam and the effective excitation laser; (c) Feature size of dual-beam and effective excitation laser on focal plane; (d) Super-resolution photoinduction-inhibition nanolithography

方法,实现超分辨数据读出。双光束超分辨数据存储技术对存储介质要求苛刻,因此虽然近年来双光束超分辨激光直写制造技术和显微成像技术均获得了长足的发展,然而可支持双光束超分辨数据存储技术的存储介质少之又少,这使得其产业化应用遭遇关键挑战。

3.2 双光束超分辨数据存储介质的基本要求

日常使用的 CD、DVD 等光盘中存储介质是钛菁,偶氮等染料,这些染料均匀地旋涂在光盘中。染料在强激光辐照下会被分解并随曝光时间长短在材料上留下长短不一的坑,这就是光盘的写入过程。这些染料在强激光下表现出了很快的热分解速度,辐照后不会产生额外产物并对周围染料造成影响。这些染料在日常条件下较为稳定,实际存储寿命大于 20 年。然而基于激光反射信号数据读出的染料并不适合作为下一代超高密度存储介质,因为即使通过调配材料损伤阈值减小了记录点的面积,并不能解决后续数据读出过程中因激光聚焦光斑尺寸过大而引起的相邻轨道数据串扰的问题。双光束超分辨数据存储技术将记录点的荧光信号而非激光辐照在记录点上的反射信号作为读出信号,可以实现高密度数据记录点的物理分辨读出。面向产业化应用,双光束超分辨数据存储技术要求其存储介质满足以下几点要求:第一,材料可以大规模工业制造,并尽量避免使用复杂的化学合成工艺,比如一般情况下,利用基底材料掺杂纳米颗粒作为存储介质是不可行的,纳米材料虽然具有特殊的光学性质,但是生长要求苛刻,在基底材料中的位置分布均匀性难以保证,颗粒会造成光散射,不能够长时间稳定,长期存放会出现解离扩散等现象;第二,材料最好可以软化,可以被制造成均匀的薄膜,这是为了保证材料可以通过旋涂等简单而且便于大规模工业应用的工艺实现存储介质在光盘上的放置。如需要采用溅射镀膜等工艺,将导致光盘制造成本大幅度增加;第三,材料制成薄膜后,被超过一定强度阈值的激光辐照可以产生性状变化以实现数据记录,这些性状变化包括材料折射率、荧光、局域密度等变化;第四,材料在日常的一些环境参数变化下,其性状保持稳定,比如能够承受日常照度辐照,温湿度的变化而不会出现明显的老化;第五,存储材料被激光多次读写后,不能够有明显的膨胀或收缩,以及数据点不会因多次读取而性状改变。因此除了在特定环境下保存若干年,光盘性能保持稳定的静态光盘寿命参数外,还应该有一个在正常使用条件下,一次写入经过若干次读出后,

数据读出原始误码率仍然保持不变的动态寿命参数。在某些特定的使用条件下,动态寿命的意义甚至超过静态寿命参数。除此之外,存储介质必须同时支持双光束超分辨数据写入和双光束超分辨数据读出。下面将详细讨论这一点。

3.3 双光束超分辨数据存储读写系统方案

光存储数据读写系统包含光机电以及存储介质各方面,其基础关键部分是数据写入,数据读出及精密伺服三个方面。在满足可观速率读写的情况下,满足上述三个条件并配以合适的存储介质即具备了产业化的基础。下面将阐述双光束超分辨数据存储读写系统面向产业化应用所面临的关键困难和问题解决思路。

3.3.1 双光束超分辨数据写入与读出

双光束超分辨数据存储读写光斑的形状和特点继承 STED 成像技术中双光束的形状和特点。写入时,双光束在存储介质中存储位置局域聚焦,写入激光束引发材料性状改变,例如局域荧光增强或者是荧光波长漂移,以此区分数据记录点与其周围未记录的空白处。第二束写入环形抑制光改变写入激光聚焦点周围的物理化学环境,比如电子态密度或者是化学环境,或者化学分解。这些变化能够抑制两束光聚焦光斑中心重叠区域写入激光对存储材料引起的变化,从而实现了数据点的光学超分辨写入。

在数据读出过程中,采用两束光对光学超分辨写入的数据点进行超分辨读出。读出激光激发写入数据点材料,使其基态电子跃迁到激发态。数据写入点材料从激发态跃迁回基态并辐射出一定波长 λ_0 的荧光。数据读出过程采集波长 λ_0 的荧光信号并利用荧光信号强度与位置的关系来区分不同位置的写入数据点。第二束波长为 λ_1 的读出环形抑制光使写入点荧光材料处于激发态的电子以受激辐射的形式跃迁到一个较低的能级,然后再经过无辐射弛豫返回到基态,该过程会辐射出波长 λ_1 的光子。这个提高读出分辨率的方法与 STED 成像技术基本相同。

当前,实现双光束超分辨数据写入与双光束超分辨数据读出的方法有很多。虽然很多不同于常规受激辐射损耗机理的方法能够实现更高的单独写入或读出的分辨率。然而,其关键困难是如何将这些不同的方法在同一个存储介质中同时实现。在本文中,考虑到受激辐射损耗机理的普适性,作者建议宜尽量采用受激辐射损耗机理去实现超分辨数据读写。这是因为:第一,从目前已有的文献资料中,采用受激辐射损耗

机理实现双光束超分辨成像的材料占整个此类材料中的大部分,这有利于大大降低材料开发的难度。第二,在双光束超分辨数据写入的过程中,存储介质只有吸收了写入激发光的能量,并将该能量用于诱导介质发生目标性能变化才能实现数据写入。显然,对于很多材料,写入激光使存储介质发生性能变化,会经过多步涉及到光物理和光化学的过程。而写入抑制光抑制介质发生目标性能变化,并不需要抑制所涉及的光物理和光化学过程中的每一步,而仅仅只需要抑制其中的某一步或者某些关键步骤。此时,受激辐射损耗机理将材料用以支持发生光物理和光化学过程的能量通过受激辐射的方式以光子能量的具体形式损耗掉,也具有一定的普遍性。

普适性地实现双光束超分辨数据写入和读出机理,不仅仅可以降低材料开发的难度,也同时有利于降低双光束超分辨数据读写系统的开发难度。更加普适的双光束超分辨读写机理,有助于利用不同的双光束激光波长实现超分辨实际效果,这使得存储介质对特定双光束激光波长的依赖性大幅度降低。考虑到读写过程都需要双束光参与,同时还需要引入超分辨精确伺服定位光学系统以实现在精确位置上的数据写入,本文建议所需要开发的双光束超分辨数据读写系统装置宜采用读写分离的形式,而非像普通蓝光光驱一样读写集成于一体。一方面,超高容量光数据存储装置将普遍面向数据中心应用,一次写多次读即可满足绝大部分应用场景。另一方面,这种读写分离的形

式将大大简化光学装置的工程开发难度。在读写分离的形式下,考虑到弱光信号探测中探测器的灵敏度问题,需要尽可能将数据读出的光波长放置在探测器灵敏度最高的可见光区域并具有足够宽的信号探测光波段区间,这有利于降低原始误码率并同时减少弱光探测信号积分时间进而提高读出速度。这要求双光束激光波长尽量远离信号探测光波段。降低存储介质对双光束激光波长的依赖性将为读写系统在不同光波段实现不同功能提供更多的选择性。

3.3.2 双光束超分精确伺服定位

双光束超分辨数据存储实现产业化应用需要解决伺服定位的问题,并且因为此时光盘上的数据点尺寸更小、密度更高,需要实现超高精度的伺服定位。盘面的精确伺服定位主要包括轴向定位与径向定位。轴向定位指的是在垂直于光盘的方向对盘面进行定位,主要解决光学头及盘片因运动或震动产生相对位移从而使光斑无法精确聚焦在存储介质存储平面上的问题。为进行超分辨光学轴向定位,本文提出可以在盘中添加一些不影响存储的定位用荧光材料,并使之按照一定的图案分布。如图 2 所示,进行轴向定位时,基于 STED 成像技术原理的双光束聚焦在该定位荧光材料上,激发出的荧光信号被探测器收集。当聚焦光斑的中心位置恰巧处于定位荧光材料上时,这时荧光信号最强。相比于现有 CD、DVD 和蓝光光驱系统中的单光束像散法定位,双光束超分辨精确伺服定位方法对材料作用的有效光强在空间分布上更加集中,所

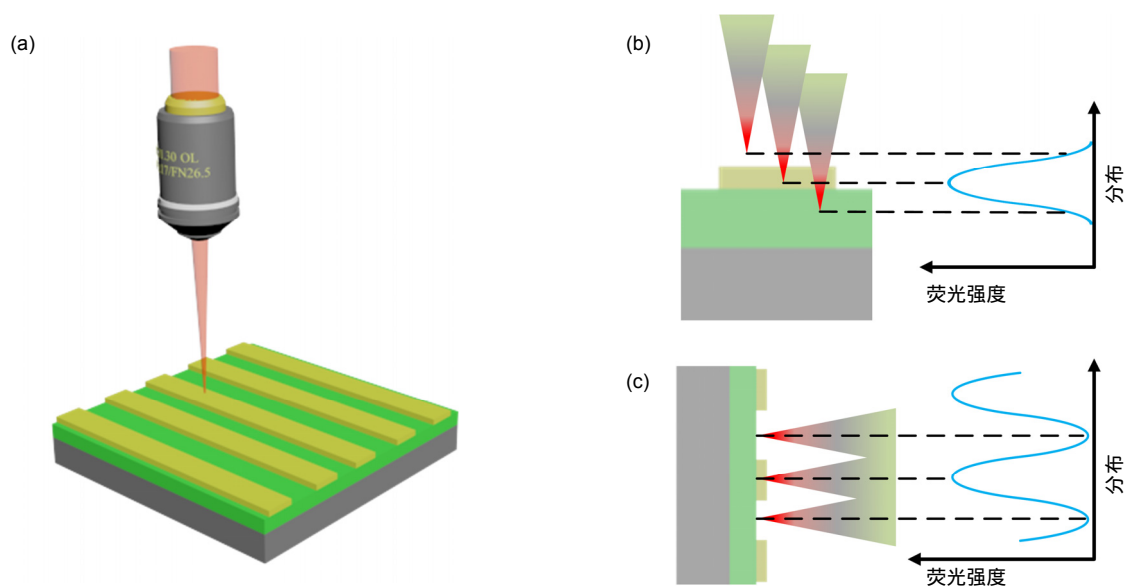


图 2 (a) 双光束超分辨扫描盘面; (b) 荧光轴向定位; (c) 荧光径向定位

Fig. 2 (a) Dual-beam super-resolution scanning disc surface; (b) Fluorescent axial positioning servo; (c) Fluorescent radial positioning servo

以当荧光材料与双光束聚焦光斑中心位置发生偏离时,光电探测器所探测到的荧光信号强度会锐减。为实现光学头对光盘的径向定位,同样基于上述荧光材料,可以使其具有和数据轨道上相同的平面结构。光学头在径向发生相对位移时,双光束聚焦光斑中心点落在数据轨道上时,得到荧光信号最弱;落在荧光材料上,时信号最强。以此可以判断焦点是否在数据轨道上,以实现数据轨道精确跟随。上述两种伺服均应用到了 STED 成像技术。系统中光电探测器,计算机和伺服电机等构成比例-积分-微分控制回路,以对光盘与光学头的相对位置进行实时定位和调节。

3.3.3 双光束超分辨存储技术的数据读写速度要求

要实现某项光存储技术的产业化应用,首要条件是看该技术是否可以实现可观的写入及读取速度。数据传输速度受限于数据读写与伺服等实际过程。一般情况下,在数据读写中,写入过程耗时较长,这是因为材料局域性状态发生改变需要获得足够时间的写入激发光辐照从而得到足够的能量。这个时间受到一般光物理和光化学过程所需时间的限制,由于大部分光物理和光化学过程的时间范围都在几十纳秒以上,因此很难实现速度超过 GB/s 的单点写入。同时双光束超分辨数据读取过程依赖于荧光信号的读取。荧光信号一般比较弱,同时在超衍射极限分辨率的情况下,数据记录点体积小,荧光材料少,因此会进一步减弱信号强度。考虑到大部分荧光材料的寿命都在纳秒以上,因此必须积累足够的信号强度才能够取得可实用化的低原始误码率。这使得双光束超分辨数据读出的速度一般难以超过 GB/s。同时,考虑到采用双光束超分辨荧光精密伺服定位技术,实现精确定位将耗费更多的时间,因此双光束超分辨数据存储技术必须在工程上放弃单点数据读写的方式。基于空间光调制器的多焦点并行读写技术被普遍认为可大幅度提高读写速度。因此,我们建议采用点阵图案盖章的具体形式来进行多焦点数据读写。此时,盘片的旋转速度可以大大降低,有利于降低读写系统开发的难度。

4 总结与展望

本文简要介绍了双光束超分辨数据存储技术的特点,以及该技术在产业化进程中普遍面临的一些关键难题。针对这些难题,我们提出了解决问题的可能方法和思路供大家参考。这些方法和思路不仅有助于双光束超分辨数据存储技术的产业化实现,也可应用于

双光束超分辨制造技术,双光束超分辨成像技术和超精密光学控制技术。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Rittweger E, Han K Y, Irvine S E, et al. STED microscopy reveals crystal colour centres with nanometric resolution[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(3): 144–147.
- [3] 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.
- [4] Andrew T L, Tsai H Y, Menon R. Confining light to deep sub-wavelength dimensions to enable optical nanopatterning[J]. *Science*, 2009, 324(5929): 917–921.
- [5] 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.
- [6] Stocker M P, Li L J, Gattass R R, et al. Multiphoton photoresists giving nanoscale resolution that is inversely dependent on exposure time[J]. *Nature Chemistry*, 2011, 3(3): 223–227.
- [7] Cao Y Y, Gan Z S, Jia B H, et al. High-photosensitive resin for super-resolution direct-laser-writing based on photoinhibited polymerization[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19486–19494.
- [8] 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.
- [9] Harke B, Dallari W, Grancini G, et al. Polymerization inhibition by triplet state absorption for nanoscale lithography[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(6): 904–909.
- [10] Wollhofen R, Katzmann J, Hrelescu C, et al. 120 nm resolution and 55 nm structure size in STED-lithography[J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10831–10840.
- [11] Liu T C, Zhang L, Sun J, et al. Optical properties of dithienylethene and its applications in super-resolution optical storage[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0903001. 刘铁诚, 张力, 孙静, 等. 二芳基乙炔的光学性质及其在超分辨光存储中的应用[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0903001.
- [12] Göttfert F, Wurm C A, Mueller V, et al. Coaligned dual-channel STED nanoscopy and molecular diffusion analysis at 20 nm resolution[J]. *Biophysical Journal*, 2013, 105(1): L01–L03.
- [13] Hell S, Jakobs S, Andresen M, et al. Method and apparatus for storing a three-dimensional arrangement of data bits in a solid-state body: 20070047287[P]. 2007-03-01.
- [14] Polyakova S M, Belov V N, Bossi M L, et al. Synthesis of photochromic compounds for aqueous solutions and focusable light[J]. *European Journal of Organic Chemistry*, 2011, 2011(18): 3301–3312.
- [15] Gan Z S, Evans R A, Gu M. Far-field super-resolution recording and reading towards petabyte optical discs[C]//*Frontiers in Optics 2016*, Rochester, New York United States, 2016.
- [16] 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.
- [17] Nielson R, Kaehr B, Shear J B. Microreplication and design of biological architectures using dynamic - mask multiphoton lithography[J]. *Small*, 2009, 5(1): 120–125.

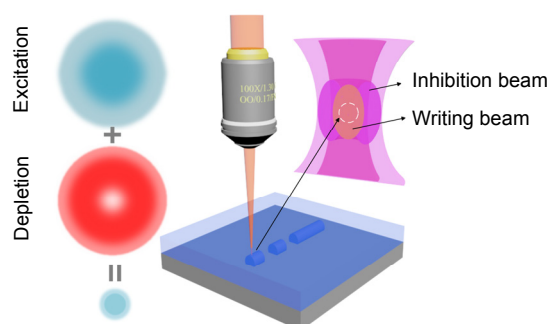
Industrialization oriented technology of dual-beam super-resolution data storage

Luo Zhijun¹, Liu Yanan¹, Chen Menglin¹, Deng Lin¹, Gan Zongsong^{1,2,3*}

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;

³Shenzhen Huazhong University of Science and Technology Research Institute, Shenzhen, Guangdong 518057, China



Schematic of stimulated emission depletion microscopy and super-resolution laser nanofabrication

Overview: Compared with the hard drive disk and solid state disk, longer storage lifetime and lower energy consumption data storage is required for Big Data centers. Optical data storage has the advantage of these two characteristics, but for traditional optical discs, such as blue-ray discs, their storage capacity is limited because of optical diffraction. Ultra high density optical storage has been extensively studied in recent years for its potential application for Big Data centers. Dual-beam super-resolution optical data storage has the potential to achieve petabyte capacity for a single standard disc by overcoming the optical diffraction limit. This dual-beam super-resolution storage technology combines technologies of dual-beam super-resolution laser nanofabrication and stimulated emission depletion (STED) microscopy. Dual-beam super-resolution laser nanofabrication can realize 9 nm feature size and about 50 nm feature resolution. STED microscopy has obtained a best resolution 5.8 nm at the current state of the art. Dual beam super-resolution optical data storage employs two lasers. One has a Gaussian shape of its focus plane, and the other is focused as a doughnut shape with zero intensity at the center. The doughnut shaped beam depletes the effect of Gaussian shaped laser interacting with materials in the processes of data recording and readout to acquire a resolution beyond the optical diffraction limit. For industrialization of dual-beam super-resolution optical data storage, we illuminate the key problems of storage medium, super-resolution data recording, super-resolution data readout and super-resolution positioning. The storage medium should be a solid film after disc fabrication, and have material property change such as fluorescence intensity enhancement induced by local illumination of the Gaussian shape laser to enable data recording and readout. The storage medium should be specifically designed to be capable of adopting the dual-beam approach to realize super-resolution. Except super-resolution recording and readout, super-resolution positioning technology is also required to guarantee position accurate data manipulation at the nanoscale. We propose a STED microscopy approach for super-resolution positioning in the super-resolution optical data storage setup. To simplify the optical system integration with a best achievable stability, separated super-resolution optical data recording and readout setup is suggested. The method to speed up data recording and readout is also discussed.

Citation: Luo Z J, Liu Y N, Chen M L, *et al.* Industrialization oriented technology of dual-beam super-resolution data storage[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(3): 180559

Supported by National Natural Science Foundation of China (61775068, 61432007)

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