

高密度数字光存储技术

李若平 赵磊 翟凤潇

随着信息科学的迅速发展,对存储介质的存储密度和存储容量的要求在不断提高,然而传统的信息存储方法已几乎接近物理极限,于是寻找新的存储介质和存储方法就成为近年来信息科学的研究热点。光存储技术是继磁存储技术之后的又一新兴技术,它利用光改变物质物理或者化学性质存储信息,近年来不仅取得了重大的技术突破,而且形成了一个庞大的产业。现在以光盘为代表的光学数字数据存储技术已成为信息存储中不可缺少的载体。与以往的磁存储相比,光盘存储的优点是存储容量大、密度高、寿命长、信息的信噪比高,可以非接触式读写和擦除等。

现在使用的光存储技术一般还是单面或者双面(新的DVD技术也只能存储有限的几层)的光盘存储,虽然记录的激光束可以聚焦得很小(如1微米),但是受电磁波衍射的限制,很难使数据位的分辨率小于半个波长,从而限制了光存储面密度的进一步提高。为了突破面密度的限制,人们在二维存储平面之外向更高维扩展,发展三维(甚至四维)的存储空间。这里的第三维不单指存储介质的物理空间维度,还包括:布拉格选择性^{*}入射的光的入射角度、频率、波长等。三维光存储是提高存储容量和存储密度的一种有效手段。下面介绍几种高密度存储技术。

近场光学存储技术

近场光学存储是高密度光存储的一个主要研究领域。在光存储系统中,光束经透镜聚焦照射到介质上,但是由于衍射的限制,聚焦光斑直径 $d = 0.6 \lambda / NA$ (其中 λ 为入射光的波长,NA是透镜的数值孔径,一般情况下其数值不大于1),光斑直径很难会聚到半个波长。基于超衍射场分辨的近场光学原理和方法,可突破这一限制,使光斑直径小于半个波长从而将存储密度提高几个数量级。现在国内外近场光学存储研究主要集中在固体浸没透镜近场存储、探针近场存储、超分辨近场结构存储几个方面。

固体浸没透镜(SIL)存储 固体浸没透镜存储技术主要靠提高光学头的有效数值孔径来实现高密度信息存储。固体浸没透镜与显微镜中的油浸透镜原理相同,只是不和物体直接接触,可以自由运动,

因此适合做光存储系统的光学头。通常把固体浸没透镜做成半球形或者超半球形,甚至将记录介质作为浸没透镜的一部分。一个固体浸没透镜插到光盘读写头聚焦透镜的下方,使聚焦点位于固体浸没透镜的下平面处,可实现提高光学头有效数值孔径、减小光斑直径的目的。有关理论计算表明:线偏振光透过固体浸没透镜后,不但在近场范围内减小了光斑直径,而且还保持了入射激光的偏振态。飞行光学头的设计是固体浸没透镜存储系统中的关键技术。气动悬浮飞行光学头,可有效地保持近场距离。虽然目前飞行光学读写头的设计还存在一定的困难,但是随着研究的深入以及相关技术的发展,相信在不久的将来这些困难终将解决。人们会设计出稳定可靠的光学读写头,使固体浸没透镜存储技术投入实际应用。

探针型近场存储 扫描隧道显微镜(scanning tunnelling microscope, STM)、区域发射探针(field emission probe, FEB)和原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)的发明,使人类可以观察和操纵原子,并对物体表面进行修饰和微加工,成为高密度信息存储研究中的有力工具。探针型近场光存储也是超高密度信息存储领域的研究热点,探针存储是基于原子尺度上的操作,基本上是一个穿孔卡片系统。但在原子尺度上,某个特定点原子的特性表示为二进位的0或1;因此人们可以利用这些装置在原子水平上移动和感知原子群体,当对其中的原子加热时,这些原子可从一种状态变成另外一种状态(如从无晶态到结晶态)。探针尖将一束光照射到一个特定的区域,这束光线会写入或抹去一个数据位。一束较弱的光通过检测与电特性相关的特征值(如电阻)来读出数据。台湾的蔡定平等曾利用探针近场存储方法在一次性商用存储光盘上存入小于100纳米的信息点。不过探针型近场光学存储技术仍然存在很多技术困难,如光纤探针的制造、孔径与记录介质间的距离难以精确控制、探针头的透光率不高等。

超分辨近场结构(Super-RENS)存储 超分辨近场结构存储技术是传统高分辨光盘存储技术和近

场光学技术的结合,在激光束的照射下,记录介质层上的掩膜层可以动态地产生高精度的导光孔径,使记录光束直径突破电磁衍射的限制。记录“窗口”主要通过掩膜层材料的光(热)致相变、变色或光化反应产生光散射中心而形成,该散射中心在紧靠掩膜层的记录层间形成盘内探针。日本的富永淳二(J. Tominaga)等人领导的研究小组先后提出用Sb和 AgO_x 材料做掩膜实现超高密度光存储。Sb为无机相变材料,在激光束的照射下,能量很高的光斑中心处晶态Sb被熔化,使Sb转化为晶态,掩膜出现一个透光小孔。激光照射到记录材料层,当激光撤除后Sb又转化为晶态。 AgO_x 做掩膜的机理与Sb有所不同:在光的照射下 AgO_x 可以发生分解反应,生成的Ag颗粒形成散射中心,把光散射到近场的记录层。 AgO_x 分解物在两层保护层之间,当激光撤去后又会生成 AgO_x ,同时Ag粒子有表面等离子体增强效应,可以提高信息记录的信噪比。与前两种存储方案相比,超分辨近场结构存储有自己的独特优点:整个近场结构都做在光盘片上,利用掩膜的厚度可以很好地控制光孔与记录层的距离,通过改变入射激光束功率可以动态地改变透射光孔的大小。

双光子存储技术

双光子技术是美国科学家兰兹比斯(P. M. Rentzepis)于1989年提出的,在三维成像和三维存储技术中有广泛的应用前景。我们知道,吸收一个或两个光子的分子或原子会被激发到高能态,如图1(a)。双光子存储的基本原理是,当两束光照射到存储介质上时,介质的分子或原子吸收了两束光的两个光子,而从一个电子能态激发到另一个电子能态。第一个光子把受激原子(分子)激发到中间的一个虚拟态,第二个光子把原子(分子)激发到实际的激发态。图1(b)与两光子过程不同的是:双光子过程中两个不同或相同波长的光子中的任意一个都不能被单独吸收,只有两个光子同时照射到介质上才能被吸收,由于中间态是虚拟态,这要求两束光在时间和空间上都要重叠,才能把原子激发到激发态。介质中原子激发的速率与入射的两束光光强的乘积成正比,因此只有在两束光交叠的区域才发生双光子吸收过程。只要改变两束光入射的方向,就可改变光束的聚焦点,实现在存储介质空间中的三维寻址。同时由于双光子激发局限在焦点附近的很小区域内,这样小的有效作用体积使双光子吸收具有很

好的空间分辨率,能够将信息写到焦平面上,不会对邻近层产生层间串扰作用,避免了写入与读出过程中产生的擦除作用,可以进行多层数据存储,极大地提高了存储密度和容量。

双光子存储技术可以利用材料的折射率、吸收率、荧光或者电性质的变化,实现数据信息的存储与读出,可作为双光子存储材料的有光致变色材料、光致聚合材料、光致荧光漂白材料和光折变材料等。

光致变色材料 光致变色材料有两种同分异构体A和B,在记录光的作用下同分异构体A转化为同分异构体B。B只对读出光有吸收作用,但不吸收记录光。若用A、B两种同分异构体分别对应数字“0”和“1”,便可实现数字式数据存储。具体的记录过程为:先用只对A有吸收的 λ_1 照射记录介质,使存储介质由状态A转化为状态B;记录光 λ_2 加载了二进制编码的信息后,照射到记录介质上,照射的区域转化为状态A,从而记录二进制编码的数字“0”;未被照射区域的材料状态仍为B,记录的是二进制编码的“1”。信息的读出过程可以用介质的透射率或者折射率的变化读出记录的信息。透射率读出是用 λ_2 照射记录信息的介质材料,通过 λ_2 透射率的不同得到记录的信息。折射率读出则是用A、B都不吸收的 λ_3 照射记录信息的介质,通过测量折射率的不同来获得信息。迄今为止,已有多种光致变色材料用于三维数字存储的研究和实验,主要材料有罗丹明B、螺吡喃、葱类衍生物、俘精酸酐类化合物、偶氮类化合物和细菌视紫红质等。

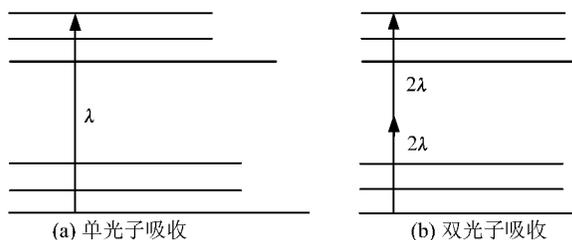


图1 单光子和双光子吸收过程

光致聚合材料 光致聚合材料是把双光子吸收分子掺入光聚合物体系,双光子材料在光的照射下吸收光子,引发聚合物体系的光聚合作用,使聚合区域和未聚合区域的物理性质或化学性质发生改变从而记录信息。由于聚合物体系可以做成比较厚的存储介质,激光经聚焦可以深入到材料的内部,在焦点附近的区域发生双光子吸收,实现三维数据存储和多层记录,从而提高存储容量。有关研究表明,利用

双光子吸收引发材料的聚合存储时,数据密度可高达太位每立方厘米,这种材料体系一般包括光引发剂、单体、粘结剂,以及其他填充物等。但是,目前光致聚合体系中引发剂的双光子吸收效率很低,是该类型材料的一大缺点。

光致荧光漂白材料 光致荧光漂白材料是在聚合物中掺入荧光染料物质,它被双光子激发后发出荧光,荧光强度与入射光光强的平方成正比。当光强高于一个阈值时,激发点的染料就会被漂白,漂白点在相同频率光的照射下便不再发出荧光,因此可以用高于阈值的光来记录数据信息。用低于阈值强度的光来读出时,漂白的点不发荧光,对应二进制的“0”;未漂白的点发出荧光,对应二进制的“1”,这样就完成了数据的记录与读出。这种材料聚合物的优点是可以掺杂合适的荧光物质,以连续激光作为写入光和读出光,这使存储系统可以使用价格低廉的激光器,但是连续光照射下的漂白点会随曝光时间的增加而增大,从而降低了存储密度,故这种材料也不能用于多次可擦重写记录。

光折变材料 在众多的光存储材料中光折变材料同样引人注目。光折变效应起初被认为是一种“光损伤”作用,是高强度激光照射到光折变材料上引起其内部电荷的非均匀重新分布,导致材料的折射率变化而形成的空间调制。用于存储技术的光折变材料首先是光折变晶体,主要包括铌酸锂、铌酸锶钡、钛酸钡等。这类无机光折变材料的存储机理是,激光干涉条纹的亮区电子被激发到导带后发生迁移,迁移的电子可被电子陷阱重新俘获,经过再激发、再迁移、再俘获,最终离开光照区而在暗光区集聚。电荷的非均匀空间分布与材料之间的相互作用改变了材料的折射率,于是在材料上记录了相位全息图。虽然大量的研究和实验证实,无机光折变晶体在可擦重写方面有着独特优势,但是由于价格昂贵、制备较为困难,且不易制成盘状,对存储系统设置简易紧密化有一定限制,因此人们把目光转移到有机光折变聚合物上。在光折变聚合物体系中,感光单体在干涉光场的照射下聚合,单体浓度下降形成单体浓度分布梯度,未被照射区域的单体由浓度高的区域漂移到浓度低的区域,导致聚合物不同区域的密度不同,从而记录了干涉信息。曝光完成后,用紫外光均匀照射整个样品,使未聚合的残存单体聚合完全,固化了记录的全息光栅。有机光折变聚

合物与无机光折变晶体相比,具有制备简单、价格低廉、易于制成盘状记录介质等优点,但是不易制成很厚的记录膜、曝光有褶皱。

激光光学全息存储技术

全息数据存储是上个世纪60年代随着激光全息的出现而发展起来的一种大容量,高密度数据存储方式。在随后的近40年里,全息光存储引起人们的广泛关注,但是由于缺少合适的记录材料,相应的光电子器件技术不成熟,光全息存储的研究进展不大。随着信息技术的发展和存储数据日渐增多,传统的数据存储方法已经难以满足需要。近10年来,激光全息存储随着相关光电子器件技术的成熟,引起广泛注意,成为研究热点。

高密度全息数字存储是利用光学全息的基本原理,进行二值化页面形式光学信息存储的方法,二值化光学信息页即数字化的光学信息,它对要存储的信息进行数字化编码后,通过空间光调制器(SLM)调制成二值化光学信息页。数字全息存储信息的具体记录过程是将二值化光学信息页作为光学全息技术中的物,将其透过或反射的相干光束作为物光束和参考光束,在记录介质的表面或体积中相互干涉记录成全息光栅即全息图。信息的读出即光学全息的再现过程,用满足全息光栅布拉格条件的参考光束照射全息图,全息光栅的衍射将二值化光学信息页再现,用探测器(CCD)接收再现像,并将其恢复成原始的数字化信息,其基本原理如图2。

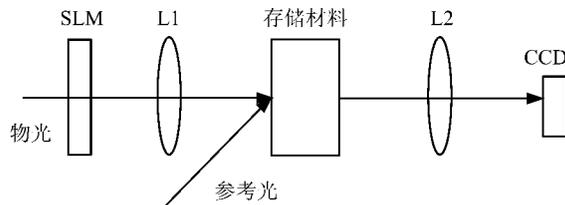


图2 全息光信息存储示意图

激光全息存储读出再现,依据严格的布拉格选择条件,人们发明了许多复用技术以实现信息的高密度大容量存储。全息光学信息记录材料和记录方法的研究在近几年进展很快,日本奥普特沃尔公司(Optware)在美国加利福尼亚召开的光存储技术国际会议(ODS 2004)上,首次公开了全息光盘记录及播放装置。同相公司(InPhase)宣布已经开发出一款全息光驱原型,该设备能够提供高达1.6TB的容量,并成功进行了存储密度达每平方英寸515Gb的全息光存储演示,这相当于硬盘领域300Gb/平方英

寸的记录,而目前使用垂直记录的最高磁记录密度是每平方英寸170GB。同相公司承诺第一代产品的存储空间将为300GB。到2009年,公司的目标是达到1.6TB,数据传输速率大概将是每秒27MB。记录材料可以使用无机光折变晶体和有机聚合物材料,由于无机晶体价格高、不容易制成盘状记录材料,近年来国内外大量研究了有机光聚合物材料。由于在聚合物体系中可以加入不同光敏剂,使有机光聚合物材料能够对不同波长的光敏感,降低了存储系统对激光光源的要求。

激光全息数据存储具有以下几个特点。

存储密度高 利用体全息图的布拉格选择性或者其他选择性可以在材料的同一位置存储多幅全息图,系统的有效存储密度很高,如用可见光,理论上的存储密度可达每立方厘米 10^{12} B。

超快存取速度 信息是以页为单位并行读写,具有极高的数据传输速率,其极限值由I/O器件决定。采用巨型并行探测阵列有可能达到每秒1GB的传输速率。



图3 日本奥普特沃尔公司的激光全息记录光碟HVD与DVD-R的比较

高冗余度 数据信息是以全息图形式存储在介质一定的体积空间内,因而具有较高的冗余度,介质的局部缺陷只会降低信号强度而不影响数据完整。

寻址速度快 参考光可以采用声光、电光等非机械式寻址,与传统的机械寻址方式需要10毫秒相比有很大提高,寻址访问时间可以降低至亚毫秒范围甚至更低。

光谱烧孔四维存储技术

光谱烧孔技术是利用分子对不同频率光的吸收率不同来识别分子,光子选通光谱烧孔技术作为一种高密度信息存储方式是莫纳(W. E. Moerner)提出的。其基本原理是:首先用某一频率为 ν_0 的窄带激光去照射记录介质,与 ν_0 共振的分子对光有强吸收,被激发到激发态。读取时当用一窄带可调谐激

光去扫描记录信息的介质,由于介质中与 ν_0 共振的分子被激发扫描激光在 ν_0 处会出现饱和吸收现象,而在扫描线的其他位置只有正常吸收。探测介质的吸收谱线会在 ν_0 处有一个凹陷被称为“拉姆凹陷”即被扫描激光烧的“孔”。利用有“孔”和无“孔”对应1和0状态就可实现信息的数字化存储和读出。

被烧出的孔的存在时间就是分子在激发态的寿命,许多场合要求信息的存储时间要长,如果使发生共振的那部分分子在强激光的作用下产生光化学或者光物理变化,这种变化可以持续较长的时间,则“孔”(即记录的信息)存在的时间就长。这种方法称为“持续烧孔技术”。

当在介质的荧光吸收谱内调谐烧孔光谱时,可以在介质的同一个位置烧出多个不同的孔分别对应不同的频率。烧出的孔的个数称为孔的“复用度”。复用度的大小与记录材料分子的非均匀加宽和均匀加宽的比值有关。光谱烧孔存储技术是基于分子级的存储技术,不但将烧孔激光的频率作为一个存储的维度,还可以与前面提到的光学体全息存储技术相结合实现四维信息的高密度、大容量存储,在高密度海量存储中具有较高的应用价值。但是由于分子的激发态寿命对温度高度依赖,因此要实现高温下光谱烧孔存储,寻找合适的存储材料仍是一个难题。

除了上面介绍的几种高密度信息存储技术之外,还有其他新的存储技术也在发展之中。每种存储技术都既有优点、又有缺点,想要投入实用仍有许多工作要做。但是随着信息社会对高密度信息存储和处理的要求越来越迫切,大容量、高密度、可靠性好和高传输速率的光存储技术一定会出现,相信随着各种相关技术的不断发展和完善,实用化的高密度海量信息存储技术和设备会离我们越来越近。

(开封市河南大学物理与信息光电子学院 475001)

* 信息读出时,读出光束方向在参考光束方向的附近的很小的范围内才会读出信息。超出这个范围角度信息的读出已不可能。这个条件称为布拉格选择条件。

