

微全息存储技术及其研究进展

万玉红^{1,2} 陶世荃^{1,2}

(¹北京工业大学应用数理学院, 北京 100124
²北京工业大学微纳信息光子技术研究所, 北京 100124)

摘要 微全息存储是按“位”进行信息存储的技术, 所存储的每个全息图代表 1 bit 的数据信息量。该技术采用两束相向传播的高斯光束在其焦斑范围内干涉, 存储材料将干涉图样记录下来形成微米大小的全息图。结合适当的混合复用技术有望在 CD 尺寸的存储介质盘内实现 1 TB 的存储容量。微全息存储器的系统结构和传统的光盘系统类似, 与现有光盘存储技术和驱动系统的兼容性好。阐述了微全息存储的基本概念和原理, 从存储材料、复用技术和实现的存储密度以及微全息存储系统等方面综述了微全息存储技术的发展和目前所取得的成果, 指出了其未来的发展趋势。

关键词 全息; 光存储; 微全息图; 三维光盘

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.100004

Micro-Holographic Data Storage Technology and Its Research Progress

Wan Yuhong^{1,2} Tao Shiquan^{1,2}

(¹College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China
²Institute of Information Photonics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Micro-holographic data storage is a bit-based volume holographic data storage technology. Localized micro-holograms are recorded at the focus of two counter-propagating beams, and each hologram represents a single bit that is subsequently read out by monitoring the reflectance of a single focused beam. The capacity can be 1 TB in a CD size disc using micro-holographic data storage technology together with hybrid multiplexing methods. It is easy to develop the compatibility of micro-holographic data storage system with the optical disc storage owing to their similar system structure. The basic concept and theoretical model of micro-holographic data storage are firstly illustrated, and then the research progress is reviewed mainly from the aspects including recording media, multiplexing technology and driving system, its future development is also pointed out.

Key words holography; optical data storage; micro-hologram; three-dimensional optical disk

OCIS codes 090.7330; 210.2860; 210.4590

1 引言

随着计算机和多媒体技术的发展, 需要处理和存储的数据量大幅度增加, 人们对大容量、高速率的信息存储技术的需求也日益迫切。光盘存储技术已成为当代信息社会中不可缺少的信息载体, 但是光盘存储是二维的光存储技术, 将数据按“位”的形式记录在介质盘的表面, 能分辨的最小记录符尺寸受到远场光学衍射极限的限制^[1]。发展和研究近场光学存储技术是进一步提高二维光存储的密度和容量的途径之一^[2,3]。如果将光存储技术从二维发展到三维, 存储密度将得到大幅度提高。体全息存储技术是 20 世纪 60 年代随着激光全息术的发展而出现的一种高密度三维光存储技术。与其他光学信息存储技术相比, 体全息技术在存储容量方面有着巨大的优势, 其存储容量理论上可以达到 V/λ^3 (V 为存储材料体积, λ 为记录光波长)。再加上体全息图具有冗余度高、数据可并行读取和读取速率快等独特优点, 体全息存储技术被认为是颇具潜力

收稿日期: 2012-04-19; 收到修改稿日期: 2012-06-11; 网络出版日期: 2012-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61107002)和北京市人才强教深化计划-中青骨干教师项目(006000543112518)资助课题。

作者简介: 万玉红(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事全息及光信息处理方面的研究。E-mail: yhongw@bjut.edu.cn

的下一代海量信息存储技术^[4],因此近几十年来得到了广泛的研究。

体全息存储技术在发展之初以“页面式”存储系统为主流^[5~8],即以整幅数据页的并行存取为主要特征,采用双光束干涉实现信息的记录,利用光栅的衍射实现信息的再现。每个全息图代表一个二维数据页,可以包含约 1 Mbit 的数据信息,所以这种技术在存储容量和数据的存取速率方面有独特的优势,但是系统需要用到空间光调制器、图像探测器等器件使系统结构复杂、成本较高,并且与现有光盘存储系统、计算机系统兼容性差,所以在实用化进程中受到限制^[9]。微全息存储的方法是 20 世纪末提出的,它结合了传统光盘按“位”存储的概念和体全息记录的原理,用微全息图代替传统光盘存储的凹坑式点位,在记录材料内生成极小的反射全息图,每个全息图代表 1 bit 数据信息,所占空间为微米量级,因此称为微全息存储^[10],也称为“位”式体全息存储技术。微全息存储可以利用波长复用、角度复用或者波长与角度的混合复用等技术实现多重全息图复用记录,还可以利用深度复用实现信息的多层记录,增加存储的密度和容量,有望在直径 120 mm 的单盘内实现 1 TB 的存储容量^[11,12]。微全息存储一定程度上来说是日前光盘存储技术的三维扩展,其系统结构和传统的光盘系统结构类似,很容易发展与传统光盘系统的兼容性。因此,微全息存储技术一经提出就受到了广泛的关注和持续的研究,许多大学、公司等机构的研究人员对这种新型的存储技术进行了全面深入的研究,使得微全息多层光盘存储技术取得了一系列进展。

本文先阐述微全息存储的基本概念和原理,然后主要从存储材料、复用技术和实现的存储密度以及微全息存储的读写驱动系统来综述微全息存储技术的研究进展和取得的成果,并对微全息存储技术的未来发展做了展望。

2 微全息存储的机理

微全息存储的概念和原理示意图如图 1 所示。图 1(a)给出了按“位”存储的基本概念,每个数据位是一个反射式全息图,全息图大小约 $10\ \mu\text{m}$,相邻全息图间隔 $1\sim 2\ \mu\text{m}$;图 1(b)为反射式微全息图记录的光路配置。记录时采用两束相向传播的高斯光波分别作为物光和参考光进行干涉,即强度受到记录信息调制的激光直接入射到光学器件后聚焦于记录材料的光波作为物光波,经过材料下方的反射元件反射后的光作为参考光波,两光波在焦斑范围内发生干涉,材料就把这个干涉图样记录下来即形成微全息图。数据读出时,移走图中所示的反射元件,入射光照明已记录的全息图,通过全息图的衍射,再现出已存储的数据信息。利用适当的复用技术可以进行多重全息图的存储。

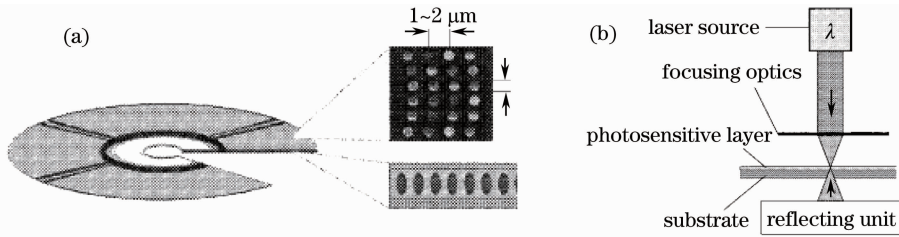


图 1 微全息存储的基本概念示意图。(a)按“位”存储;(b)反射式微全息的记录几何结构

Fig. 1 Basic concept of micro-holographic data storage. (a) Bit-based data storage; (b) recording geometry

对于高斯光束的聚焦光斑,其光能量集中于焦斑范围内,所以这里考虑微全息图仅存在于焦斑范围内,折射率调制随着离焦斑中心距离的增加而快速减小。令 y 方向表示光束横截面的任意径向, z 方向为入射光波矢量传播的方向,微全息图二维的折射率分布可以写为^[10]

$$n(y, z) = n_0 + \Delta n G(y, z), \quad (1)$$

式中 n_0 是材料的初始折射率, Δn 为最大的折射率调制度, $G(y, z)$ 是采用归一化强度定义的光栅函数,表述为两束相向传播的高斯光束干涉场的调制度^[4]:

$$G(y, z) = \frac{1}{2} \frac{1}{1 + (z/z_R)^2} \exp\left[-2 \frac{y^2}{w_0^2(1 + z^2/z_R^2)}\right] \times \left\{ 1 + \frac{1}{1 + (z/z_R)^2} [(1 - (z/z_R)^2)] \cos \phi(y, z) + \frac{2z}{z_R} \sin \phi(y, z) \right\}, \quad (2)$$

式中 ω_0 是高斯光束的束腰半径, z_R 是高斯光束焦斑中心到光束半径为 $\sqrt{2}\omega_0$ 处的距离, $\phi(y, z)$ 为相位函数^[10],

$$\phi(y, z) = Kz + \frac{2zy^2/z_R}{\omega_0^2(1+z^2/z_R^2)}, \quad (3)$$

K 为所形成的微全息体光栅的光栅矢量的大小。若两写入光波矢量均为 \mathbf{k} , 则光栅矢量的大小 $K = |\mathbf{K}| = 2k = 4\pi n_0/\lambda$ 。

通常用来记录微全息体光栅的光源均采用强聚焦的高斯光束, 以保证光栅中心部分的调制要比边缘强得多, 并且定义从焦斑中心(对应于最大折射率调制)到折射率调制下降到最大折射率调制的 $1/e^2$ 时, 微全息图所覆盖的区域为有效调制区域。给定相应的实验参数, 结合(1)~(3)式, 可以计算出微全息光栅折射率分布如图 2 所示^[4], 其折射率变化在 y 方向为高斯分布, 在 z 方向为周期性的分布。

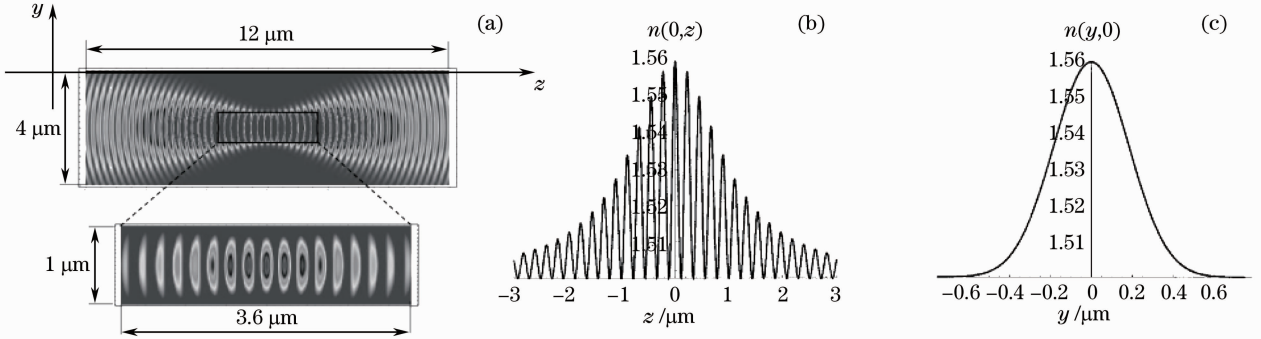


图 2 微全息图的结构和折射率调制分布示意图

Fig. 2 Basic structure and index distribution of micro-hologram

微全息图的衍射效率 η 可以根据定义(反射光功率与入射光功率之比)通过实验直接测量获得。而衍射效率与折射率调制度 Δn 以及具体的记录光路配置密切相关。Eichler 等^[10]利用二维耦合波理论分析高斯光束的布拉格衍射, 借助耦合波方程的解, 得出了微全息体光栅的衍射效率 η 与写入高斯光束的束腰半径 ω_0 、材料记录层厚度 d 以及折射率调制 Δn 之间的关系^[10]

$$\eta = \frac{\sqrt{2}}{\omega_0 \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \tanh^2 \left[\frac{\pi d \Delta n}{\lambda} \exp\left(-2 \frac{y^2}{\omega_0^2}\right) \right] \exp\left(-2 \frac{y^2}{\omega_0^2}\right) dy. \quad (4)$$

采用数值计算的方法对微全息体光栅的衍射模拟研究, 结果表明当记录光波与读出光波为同一聚焦光束时, 衍射效率的高低实际上并不依赖于束腰的大小。相应的实验结果也证明了这一点^[10]。上面给出的是基于体光栅的耦合波理论分析的微全息图衍射特性的理论分析。文献[13]和[14]中分别给出基于玻恩近似下的电磁波散射微扰理论的微全息图记录和读出理论模型, 并用于分析微全息图间的串扰噪声、系统存储的误码率以及存储材料饱和效应对信息存储的影响。

利用体全息图严格的布拉格选择性, 微全息存储技术可以通过采用角度复用、波长复用和深度复用等共同体积复用方法来实现高密度大容量的信息存储。根据理论分析, 微全息存储的密度可以表达为^[10]

$$S = m_L m_\lambda m_\theta S_A, \quad (5)$$

式中 m_L 是深度复用度, m_λ 是波长复用度, m_θ 是角度复用度, S_A 是可实现的面密度($S_A = 1 \text{ bit}/4\omega_0^2$)。根据(5)式, 如果微全息图的半径是 $1 \mu\text{m}$, 波长复用度 $m_\lambda = 10$, 角度复用度 $m_\theta = 16$, 深度复用度 $m_L = 2$, 则在 CD 尺寸的全息光盘内可以实现 100 GB 的存储容量。但是需要注意的是, 不能任意地选择各个复用度, 因为面存储密度的增加必然会减小波长和角度复用度。实际所能达到的存储密度还受到具体的光路配置、光学系统的数值孔径和材料性能的限制。

3 微全息存储技术的研究进展

开发适用于海量全息信息存储的存储材料一直是体全息存储技术发展过程中的重要一环。存储材料的性能直接影响着体全息存储器的存储密度、存储容量和存储信息的质量。

从记录材料方面来看,目前已有文献报道的微全息存储的记录材料主要有光热塑料、光折变晶体和光致聚合物。2005年,美国通用电气的Dubois等^[15]在光热塑料中进行微全息存储研究,实验结果表明,在掺染料的光热塑料材料中存储的微全息图,反射率可以达到3%,但是微全息图的尺寸比利用高斯光束的束腰值计算出来的要大得多,会导致复用度的下降,从而降低存储密度。2003年,Tverdokhlebov等^[16]提出在掺铁的铌酸锂晶体中进行多层微全息存储,他们采用了同轴多阶相移和多层记录的方法来提高存储密度,在 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 0.9\text{ mm}$ 的晶体材料中记录了50层透射式的微全息图,相邻层间隔为 $12\text{ }\mu\text{m}$,每层全息图用8阶相移编码进行复用,材料的最大折射率调制度为 3×10^{-3} 。2008年,Steinberg等^[17]采用双光子记录技术在钽酸锂晶体中记录透射式的微全息图,实现了 $3\times 3\times 3$ 阵列的微全息图记录,每个全息图尺寸为 $1.0\text{ }\mu\text{m}\times 1.4\text{ }\mu\text{m}\times 10\text{ }\mu\text{m}$,材料的折射率调制度可达 $\Delta n=1.07\times 10^{-3}$ 。光折变晶体作为记录材料,噪声低,材料无收缩,但是记录信息对写入和读出光敏感,易于被擦除,即使是在暗保存条件下,信息的存储寿命也比较短。与铌酸锂晶体相比,钽酸锂晶体内存储的信息暗保存时间长,采用双光子记录技术可以实现非易失性的读出,但是其可实现的折射率调制范围又比铌酸锂晶体低。从综合性能来看,适用于大容量高密度微全息存储并有望走向实用化的材料仍然是光致聚合物。

微全息存储技术提出伊始是在杜邦的光致聚合物(HRF-800型)材料中进行的实验研究^[4],随后在几种不同类型的光致聚合物中(杜邦的自由基聚合物和Aprilis阳离子开环聚合物等)分别进行了微全息存储特性研究^[12,18]。用于微全息存储的光致聚合物材料主要要求几方面的性能:材料对记录光的响应阈值、材料灵敏度和折射率调制范围。其中灵敏度定义为单位能流在材料中产生的折射率变化,它决定了要达到目标折射率调制或者说目标衍射效率所需的光强,从而影响全息图记录的曝光时间和记录速率等。材料的折射率调制范围 Δn 直接和写入的全息图的衍射效率相关。材料性能所要达到的具体指标,还要根据实际全息存储系统的目标存储密度、数据记录或读取的速率等参数来确定。根据美国通用电气全球研究中心的报道,如果要求微全息存储盘单层面存储容量达25 GB,记录速率为4.5 MB/s,存储20层数据,在全息图目标反射率不小于0.1%的情形下所要求的光致聚合物材料的灵敏度约为 $0.004\text{ cm}^2/\text{J}$ (记录光强度为 $150\text{ mW}/\text{cm}^2$),则最大折射率调制要达到 0.02 ^[19]。目前通用电气已开发出了满足这一要求的光致聚合物材料。

除了材料的性能,要想实现高密度大容量的微全息存储,还要利用不同的复用技术。由于微全息存储记录的仍然是体积全息图,所以可以利用体全息图的布拉格选择性进行波长复用和角度复用或者是两者组合的复用技术来实现高密度大容量的信息存储^[11,12]。2006年,Yang等^[20]将高斯光斑尺寸减小到 $1\text{ }\mu\text{m}$,焦深 $20\text{ }\mu\text{m}$,实验验证了利用两台激光器和窄带光源在 $400\sim 650\text{ nm}$ 的光谱范围内实现波长复用的微全息存储,读出过程中采用白光照明再现,微光谱计作为探测器可同时读出不同波长对应的衍射峰值。实验测得在该材料里利用可见光($400\sim 650\text{ nm}$)可实现单点15 bit的复用度。2010年,日本NEC的Katayama等^[21]对波长与角度组合复用技术进行了实验研究,实验给出了单点10 bit的复用度,其中波长复用度为2,对应于每个波长记录时,角度复用度为5。他们还提出采用页面式体全息存储中的调制码(例如2:4码,9:16码)对波长和角度进行编码,可充分利用材料的动态范围,增加存储的密度和容量。如果将上述技术再与位移复用技术组合,有望在适当减少记录层数的情形下,实现微全息存储太字节(TB)量级的存储容量。

在微全息技术发展的进程中,对于驱动系统的研究一直受到颇多关注。微全息多层光盘存储系统为开发的主要系统构型,包括双侧光路读写的系统^[12,22,23]和单侧读写微全息存储系统^[24~26]。2005年,McLeod等^[22]提出了一种微全息多层存储盘的系统构型,在标准的光盘读写驱动系统内增加一个置于记录材料下方的反射元件和一个置于数据探测器前的共焦针孔,可以在快速旋转的全息光致聚合物盘中实现微全息图的多层记录和读出,实验实现了在 $125\text{ }\mu\text{m}$ 厚的光致聚合物材料中存储140 GB的数据信息量。如果采用和蓝光光盘存储系统相同的数值孔径的物镜($NA=0.85$),则在约 1 mm 厚的材料中可实现1 TB的存储容量。2007年,Orlic等^[23]阐述了一个没有伺服装置的准动态微全息记录系统,存储材料采用了Aprilis的光致聚合物,微全息图尺寸达到了 $200\sim 300\text{ nm}$,记录光波长可采用 532 nm 或 405 nm ,轨道间距减小到 500 nm ,相邻信息层间距为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。2009年,美国通用电气研究中心的微全息存储研究组给出了他们的微全息存储系统,基于新开发的光致聚合物材料,以 405 nm 的脉冲激光器作为记录光源,在 120 mm 大小的光盘上实现500 GB的存储容量^[27]。该实验系统的原理性示意图如图3所示,系统中采用两个物镜来实现入射光和反

射光的聚焦,以使两束相向传播的聚焦光束干涉形成全息图。用于聚焦的透镜和存储材料置于三维调节台上以实现信息的复用存储。采用共焦探测的方式来接收再现出的数据信息。Sony公司的Miyamoto等^[28,29]也提出了一种微全息存储系统的构型,同样采用405 nm的激光器和两束相向传播的高斯光束干涉的形式,但是其轨道寻址伺服系统和自动聚焦控制伺服装置实现了系统在全息图写入和读出过程中的动态控制。系统的数值孔径为0.51,可实现的轨道间距为 $1.1\ \mu\text{m}$,每层可以实现1.9 GB的存储容量,层间距为 $25\ \mu\text{m}$ 。尽管其轨道间寻址的线速度还比较小且层间距较大,但是该系统主要的优势体现在对再现信息的探测精度上。

上述微全息存储系统均为双侧光路读写构型(图3)^[21],采用两个透镜分别对入射光和反射光聚焦,增加了系统的复杂性。为了进一步简化系统,利用一个聚焦物镜和记录材料的反射层的单侧光路的读写系统得到发展。Jeong等^[24]提出的单侧光路写读微全息存储系统利用了材料对不同波长的反射特性不同,他们采用红光作为伺服系统的监测光,采用蓝光作为全息图的记录和读出光。Lee等^[25,26]提出了采用衍射光学元件(DOE)的单侧光路写、读微全息存储系统,其简单的原理示意图如图4所示^[20]。系统采用DOE将入射的蓝色激光衍射,分出0级和1级衍射光波,1级衍射光波作为参考光或者物光波。这样的机制可以保证微全息图写入和读出在同侧实现,使系统更紧凑。

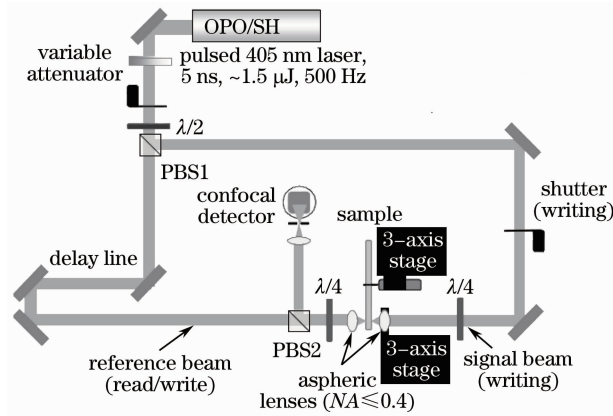


图3 微全息存储的静态实验测试系统

Fig. 3 Optical set up of double-side micro-holographic data storage system

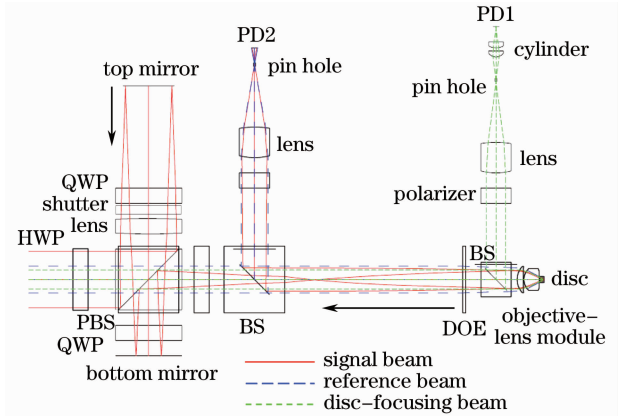


图4 单侧面微全息存储系统示意图

Fig. 4 Optical setup of single-side micro-holographic data storage system

4 结束语

海量信息存储器在向实用化发展的过程中,要综合考虑到存储容量、数据的传输速率、再现数据的误码率、存储器系统的稳健性、兼容性以及系统的成本等多方面的性能指标。对于微全息存储器而言,存储材料和驱动系统是两大核心技术。就存储材料而言,光致聚合物被普遍认为是适用于体全息存储的实用化材料。在材料面积一定的条件下,可以通过增加材料的厚度来实现存储容量的增加。但是光致聚合物材料在记录过程中的体积收缩问题又会影响记录信息的质量。所以研究记录灵敏度高、衍射效率高和无明显体积收缩的各种厚度的光致聚合物材料是微全息存储技术的研究重点之一。关于微全息存储技术的驱动系统,需要解决的难点是系统构型的简化、紧凑和小型化问题,并实现信息的高速读取。微全息存储按位读取的串行本质,使之难以达到理想的高数据读出速率。研究多阶相位存储提高存储密度以及多通道并行读出的技术也是目前微全息存储技术的一个研究热点。

综上所述,虽然微全息存储技术目前已经取得了令人鼓舞的成就,但是该技术在向实用化和集成化发展的进程中还存在一些难点有待进一步研究,微全息存储技术要向走向实用化,还需要对上述缺陷点进行深入研究和技术攻关。

由于体全息存储技术目前的局限,所以该技术还只是在专业的存储领域得到了小范围的应用。在未来的发展中,体全息存储技术还需要在存储材料和驱动系统上取得进一步的突破,来提高和完善整体性能,同

时减小体全息存储器的尺寸,降低其成本。如果能在上述方面取得突破,体全息存储技术将会打开其他应用领域的大门。相信体全息存储技术在未来的光学数据存储市场将有巨大的发挥空间。

参 考 文 献

- 1 Xu Dunyi. High Density Optical Disc Data Storage[M]. Beijing: Tinghua University Press, 2003
徐端颐. 高密度光盘数据存储[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003
- 2 Li Hao, Geng Yongyou, Wu Yiqun. Progress on inorganic laser thermal lithography materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 011602
李 豪, 耿永友, 吴谊群. 无机激光热刻蚀材料的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(1): 011602
- 3 Fang Chaolong, Zhang Yaoju. Increasing focal depth of near-field optical storage systems by five-zone amplitude-phase hybrid filter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(3): 032101
方朝龙, 张耀举. 用振幅相位杂化滤波器提高近场光存储系统的焦深[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(3): 032101
- 4 Lisa Dhar, Kevin Curtis, Thomas Fäcke. Holographic data storage: coming of age[J]. *Nature Photon.*, 2008, **2**(7): 403~408
- 5 Gu Huarong, Zhao Zhen, Cao Liangcai *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 瑱, 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
- 6 Li Jianhua, Cao Liangcai, Tan Xiaodi *et al.*. Transmission type of collinear volume holographic storage technology based on LiNbO₃ crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0409001
李建华, 曹良才, 谭小地 等. 基于 LiNbO₃ 晶体的透射式共光轴体全息存储技术[J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0409001
- 7 Guo Ruhai, Guo Jin, Guo Lihong *et al.*. Analysis on performance of two-color holographic storage based on Fe:Mn:LiNbO₃ crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3328~3332
郭汝海, 郭 劲, 郭立红 等. 双掺杂 Fe:Mn:LiNbO₃ 晶体双色全息存储性能分析[J]. 光学学报, 2009, **29**(12): 3328~3332
- 8 Shen Yan, Sun Xiudong, Zhao Yequan. Theoretical study on nonvolatile holographic recording in LiNbO₃:Fe:Mn[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 166~171
申 岩, 孙秀冬, 赵业权. 对 LiNbO₃:Fe:Mn 晶体非挥发全息存储的理论研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 166~171
- 9 Kevin Curtis, Lisa Dhar, Adrian Hill *et al.*. Holographic Data Storage from Theory to Practical Systems[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2011
- 10 H. J. Eichler, P. Kuemmel, S. Orlic *et al.*. High-density disk storage by multiplexed microholograms[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1998, **4**(5): 840~848
- 11 H. J. Eichler, P. Kuemmel, S. Orlic *et al.*. Wavelength multiplexing for the microholographic storage disc[C]. *SPIE*, 1998, **3401**: 177~186
- 12 Susanna Orlic, Steffen Ulm, Hans Joachim Eichler. 3D bit-oriented optical storage in photopolymers[J]. *J. Opt. A: Pure & Appl. Opt.*, 2001, **3**(1): 72~81
- 13 Zsolt Nagy, Pál Koppa, Enrico Dietz *et al.*. Modeling of multilayer microholographic data storage[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(5): 753~761
- 14 Zs. Nagy, P. Koppa, F. Ujhelyi. Modeling material saturation effects in microholographic recording[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(4): 1732~1737
- 15 Marc Dubois, Xiaolei Shi, Christoph Erben *et al.*. Characterization of microholograms recorded in a thermoplastic medium for three-dimensional optical data storage[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(15): 1947~1949
- 16 P. E. Tverdokhlebl, I. Sh. Steinberg, Ju. A. Shepetkin. Multilayer recording of the microholograms in lithium niobate [C]. *Photorefractive Effects, Materials and Devices of OSA Trends in Optics and Photonics Series*, 2003. 649~654
- 17 Iiya Sh. Steinberg, Yuri A. Shepetkin. Two-photon recording of microhologram in undoped lithium tantalite[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(1): 9~14
- 18 Susanna Orlic, Christian Mueller, Ruediger Schoen *et al.*. Optical storage in photopolymers using 3D microgratings[C]. *SPIE*, 2002, **4459**: 323~333
- 19 E. P. Boden, K. P. Chan, D. V. Dylov *et al.*. Recent progress in micro-holographic storage[C]. *ISOM/ODS*, 2011, OWA1
- 20 Jame J. Yang, Michael R. Wang. White light micrograting multiplexing for high density data storage[J]. *Opt. Lett.*,

- 2006, **31**(9): 1304~1306
- 21 Ryuichi Katayama, Yuichi Komatsub. Microholographic recording with wavelength and angle multiplexing[C]. *SPIE*, 2010, **7730**: 773008
- 22 Robert R. McLeod, Andrew J. Daiber, Mark E. McDonald *et al.*. Microholographic multilayer optical disk data storage [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(16): 3197~3207
- 23 Susanna Orlic, Enrico Dietz, Sven Frohmann *et al.*. Microholographic multilayer recording at DVD density[C]. ODS, 2007, MB4
- 24 T. S. Jeong, J. Bae, Y. Park *et al.*. Single-side micro-holographic storage system using selective reflection properties[C]. IWHMD2008 Tech. Dig., 2008. 18~19
- 25 S. H. Lee, N. C. Park, H. Yang *et al.*. Single-sided microholographic data storage system using diffractive optical element[C]. ASME ISPS2010 Tech. Dig., 2010. 325~327
- 26 Sang-Hyuck Lee, No-Cheol Park, Hyunseok Yang *et al.*. Optical design of a single-sided microholographic data-storage system using a diffractive optical element and a blue laser[J]. *J. Opt.*, 2011, **13**(5): 055403
- 27 V. Ostroverkhov, B. L. Lawrence, X. Shi *et al.*. Micro-holographic storage and threshold holographic recording materials [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2009, **48**(3): 03A035
- 28 H. Miyamoto. Direct servo error signal detection method for recorded micro-reflectors[C]. Joint Int. Symp. on Opt. Memories and Opt. Data Storage, 2008, MB04
- 29 T. Horigome, K. Saito, H. Miyamoto *et al.*. Recording capacity enhancement of micro-reflector recording[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008, **47**(7): 5881~5884