

全息光存储技术研究进展

黄 可, 马廷灿, 冯瑞华, 姜 山

(中国科学院 武汉文献情报中心, 湖北 武汉 430012)

【摘要】全息光存储技术是一种极具发展潜力的信息存储技术, 因其具有高信息冗余度、高存储容量和高存取速率等优点而日益受到关注。本文介绍了全息光存储技术的研究历史与现状, 并对几种具有代表性的全息光存储系统进行了评述。

关 键 词: 全息光存储; 复用技术; 双掺杂; 同轴

中图分类号: TP333.42

Development of Holographic Optical Storage Technology

HUANG Ke, MA Ting-can, FENG Rui-hua, JIANG Shan

(Wuhan Branch of the National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430012, China)

Abstract: Holographic optical storage technology is a promising technology, which attracts increasingly concern due to its advantages, such as high information redundancy, high memory capacity and high transfer rate. The paper describes the history and current status of the technology, and also reviews some typical holographic optical systems.

Keywords: holographic optical storage; multiplexing technology; double doped; collinear

1 引 言

随着社会的发展和技术的进步, 人们对信息的需求不断增加, 对信息数据存储的要求也越来越高。特别是对存储容量和速率无止境的需求, 促进了各种存储技术的发展。现有的存储技术, 如磁存储和半导体存储等虽然仍在不断地改进以满足人们对存储容量和速率等的要求, 但这些存储手段正逐渐接

近其物理极限^[1]。由于传统光盘存储受衍射分辨率极限的限制, 即使采用更大数值孔径的聚焦镜和更短的波长, 也很难进一步提高存储密度; 而近场光存储技术虽然突破了衍射分辨率极限, 可以获得较高的存储密度^[2], 但是需要光学头和盘面之间有很近的距离, 光学头需要相对记录介质作机械运动, 导致光机系统比较复杂。全息光存储技术可以不用机械的方法操作光束移动, 而利用激光束无惯性电子控制

对数据进行并行读写, 缩短了存取时间^[3]。由于采用复用技术大幅提高了存储容量, 因此在许多领域具有广阔的应用前景^[4]。

2 全息光存储的基本原理及关键技术

全息光存储的基本原理如图 1 所示。首先将需要存储的数据信息经编码后形成二进制数据流, 并以页为单位映射到空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM) 上。从激光器发出的激光经分束器分离成两束相干光, 一束光经 SLM 后携带了数据信息, 这样形成的物光进入存储介质中; 另一束没有调制的参考光直接照射到介质上, 物光和参考光由于干涉而形成的图样记录在存储介质中。利用各种复用技术, 可在介质的同一位置记录不同的数据信息。读出时, 采用与记录信息时相同的参考光照射存储介质, 将衍射光成像到探测器 (例如 CCD) 表面, 探测器阵列根据各像素所接收到的光强大小将光信号转变为电信号。

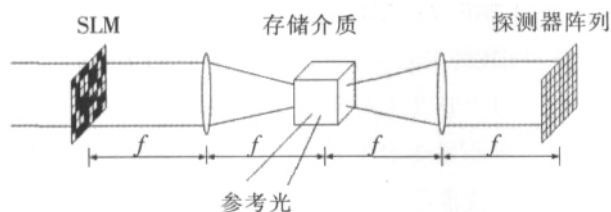


图 1 全息光存储原理图

全息光存储系统的存储容量、传输速度和系统体积都与存储介质密切相关, 因此存储介质是全息光存储的一项关键技术^[5]。用于全息光存储系统的存储介质需要具备高光学质量、高动态范围、高光敏性和高稳定性的特点。高光学质量能使携带数据信息的物光波前不失真, 降低误码率; 高动态范围能够保证复用更多的全息图, 从而提高存储容量; 高光敏性可提高介质的反应速度; 而高稳定性可避免存储数据的损坏和丢失。早期的全息存储介质采用的是卤化银敏化明胶 (SHSG) 和重铬酸盐明胶 (DCG)。目前广泛使用的主要介质包括: 光折变晶体 (如铌酸锂和钽酸锂等)、光致聚合物、光折变聚

合物和光致变色材料, 实验室中使用最多的是掺铁铌酸锂晶体 (FeLiNbO_3)。从目前的研究情况看, 光折变材料 (包括光折变晶体和光折变聚合物) 非常适用于全息光存储。

全息光存储系统采用合理的复用技术可以有效地增加系统的存储容量, 提高存储系统的性能。常见的几种复用技术包括: 空间复用、体积复用 (包括角度复用、位相编码复用、波长复用) 和混合复用等。空间复用是将不同的全息图 (数据页) 存储在记录介质的不同区域, 物光和参考光的位移依靠声光偏转器件 (AOD) 或电光偏转器件 (EOD) 实现, 它是最早发展起来的复用技术; 角度复用是全息光存储中得到最充分研究的复用技术, 基本思路是每当记录完一个全息图后, 使参考光的入射角改变一个角度再存储另一幅全息图, 但随着全息图数目的增加, 平均衍射效率会降低, 影响了存储容量; 在位相复用中一般使用正交位相编码, 参考光的波长和光束角度都是固定的, 有利于全息图的快速随机读写, 提高全息图的衍射效率, 增加读出数据的信噪比; 波长复用中每一幅全息图与一个特定波长相对应, 记录和读出过程中参考光和物光之间的夹角保持不变; 而混合复用技术只不过是上述几种复用技术的组合, 其目的也是为了进一步增大存储容量。随着全息光存储技术的不断发展, 将会出现更多的新的复用技术。

在全息光存储系统中, 采用有效的信号处理方法能抑制记录通道中存在的各种噪声, 减少数据的误码率, 通常采用纠错编码、交错和调制编码相结合的方式对数据进行编码。此外, 激光光源和其它光电器件 (如 SLM 和 CCD 等) 性能的优劣对全息光存储系统也有直接的影响。

3 全息光存储技术的研究历史与现状

20 世纪 40 年代末, 英国科学家 Dennis Gabor 提出了全息术的设想, 并于 1948 年获得了第 1 张全息图及其再现的图像。20 世纪 60 年代初, 激光器

的出现使全息术应用于图像存储成为可能, 激光因其良好的单色性理所当然地成为制作全息图最理想的光源。随后, 美国 Polaroid 公司的 Van Heerden 提出了全息数据存储的概念。20 世纪 70 年代初, 光折变材料因其潜在的高存储容量而受到科学家的关注和研究, 并被应用于全息数据存储系统, 但鉴于当时的技术基础, 全息光存储的实用化进程一直比较缓慢。20 世纪 80 年代中期, 为了避免因光盘存取速度而影响计算机性能, 美国微电子与计算机技术公司 (MCC) 和斯坦福大学的研究人员开始试验全息光存储系统, 他们的努力使存储系统及其组成部件有了显著的进步, 但影响系统的关键仍然是记录材料。

进入 20 世纪 90 年代, 计算机和互联网技术的发展引起了人类社会的巨大变革, 同时也由于光电器件 (如 CCD) 和全息记录材料领域取得的突破性进展, 再次使全息光存储成为高密度光存储领域的研究热点。1994 年, 美国斯坦福大学演示了首个数字全息光存储系统, 该实验表明了用现成元件搭建数字全息光存储系统的可行性。

1995 年, 美国国防高级研究计划署 (DARPA) 投资约 7 000 万美元, 开始实施 “光折变信息存储材料 (PRISM)” 和 “全息数据存储系统 (HDSS)” 2 个项目, 其中 PRISM 项目侧重于研究基本记录材料, 而 HDSS 则侧重于研究和开发新的光学和电子元件以及数字全息存储系统。这 2 个项目由 IBM 公司的 Almaden 研究中心、Rockwell 科学中心、加州理工学院和斯坦福大学等机构共同负责。

1997 年, 美国加州理工学院由 Demetri Psaltis 教授领导的光信息处理研究小组使用球面参考光通过移位复用在 1 mm 厚的掺铁铌酸锂晶体 (FeLiNbO_3) 中获得了密度为 $100 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 的全息存储。1998 年, 朗讯科技公司贝尔实验室利用相关复用技术在 FeLiNbO_3 晶体中实现了密度超过 $350 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 的全息存储。2001 年, IBM 公司进行了存储密度为 $250 \text{ Gbits}/\text{in}^2$ (约 $400 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$) 的实验。

2002 年 4 月, 在美国广播协会 (NAB) 展会上, 美国 InPhase 公司展示了记录容量达到 100 GB 的 Tapestry 追记型全息记录介质播放系统, 该系统可以容纳 30 min 的非压缩数字 HDTV 视频内容, 数据传输速率达 160 Mbits/s 。2002 年 10 月, 美国 Aprilis 公司推出了大容量、高性能的全息存储介质, 可在直径为 120 mm 的标准盘片上实现 200 GB 的存储容量和 200 MB/s 的数据传输速度。

与此同时, 日本 Optware 公司在全息光存储领域也取得了重要成果。2000 年, 该公司成功地将偏振同轴 (polarized collinear) 技术用于全息光存储, 并在 2004 年的光存储系统会议 (ODS) 上首次展示了使用全息光盘的记录播放装置和相应的激光头等。欧洲计算机制造商协会 (ECMA) 也将以日本 Optware 公司的同轴技术为基础制定全息存储系统的标准。

2006 年 3 月, 美国 InPhase 公司宣布成功进行了存储密度达 $515 \text{ Gbits}/\text{in}^2$ (约 $850 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$) 的全息光存储演示。2007 年 1 月, InPhase 公司与德国厂商 DSM 签订了 OEM 协议, 由后者制造其存储容量达 300 GB 的 Tapestry 300R 全息存储驱动器。

目前, 要真正实现全息光存储技术的商业化还有许多难题需要解决。磁存储和传统光盘存储所涉及的各项技术已经基本成熟, 而全息光存储则不然。由于它不仅依赖光全息技术, 还依赖存储介质、复用技术、激光光源、SLM 和探测器阵列等技术的突破, 而这些技术现在的发展水平还不能满足全息光存储低成本商业化的需要。同时, 全息光存储技术的潜在优势还不足以吸引厂商在这些技术的研发上进行重大投资, 相关技术的发展主要是由电子消费和娱乐行业等其它领域进行驱动, 这些都是全息光存储技术当前面临的困难。

4 典型的全息光存储系统

以下几种典型的全息光存储系统都来自当今在该项技术中处于世界领先地位的研究机构和公司, 他们代表了全息光存储的发展方向。

4.1 美国斯坦福大学的 HDSS WORM 演示平台

2000 年, 美国斯坦福大学为 DARPA 投资实施的 HDSS 项目开发了高传输速率、高容量的全息光盘存储系统, 如图 2 所示。该系统采用了 IBM 公司的铁电液晶空间光调制器 (FLC SLM) 记录二维数据, 最高分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$ 像素, 采用 Kodak 公司的 CCD 作为探测器, 其分辨率与 SLM 匹配, 最大帧数为 1 000 fps。利用脉冲倍频 Nd YAG 激光器 (波长为 532 nm) 进行记录和读出, 光盘安装在精密的空气静压轴承上, 使用精密光电轴角编码器

完成角度寻址, 通过利用分辨率达 25 nm 的平移台来移动装有光盘的轴承, 以对光盘的不同半径位置进行读写^[6]。同步系统使光盘不同角度位置重复寻址的精度超过 $\pm 10\ \mu\text{m}$, 从而增加了脉冲激光器所记录的全息图数目。该平台使用了定制的短焦距 (17.1 mm) 傅里叶变换透镜, 使 1 M 像素的图像从 SLM 传送到 CCD 时失真小于 $\pm 1.5\ \mu\text{m}$, 系统成像的数值孔径为 0.36。物光和参考光束通过同一套光学系统, 使整个系统的尺寸达到最小。光学设计以完全对称的方式进行, 这样能获得最小的图像失真。

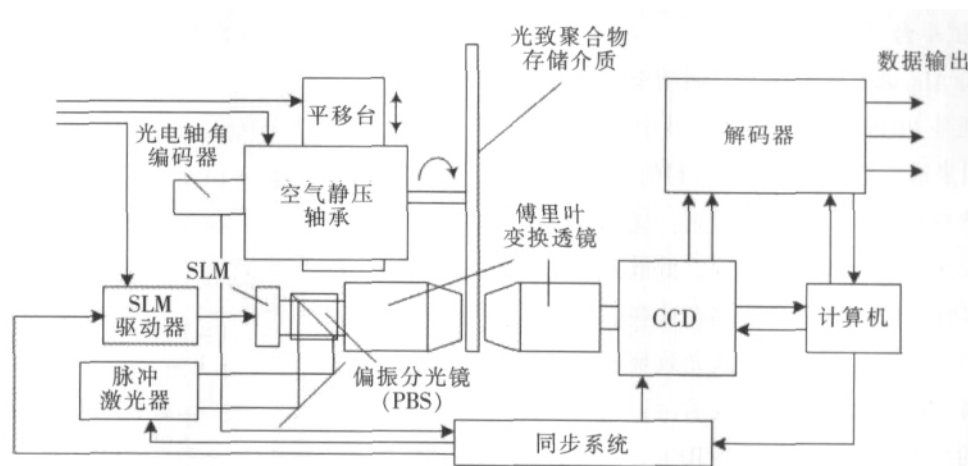


图 2 美国斯坦福大学的 HDSS WORM 演示平台系统示意图

系统的全息信道解码传输速率可达 1 Gbits/s, 使用 1 次写入多次读取 (WORM) 的光致聚合物作为存储介质, 容量为 120 GB。由于较厚的介质 (如 LiNbO_3 晶体) 的存储容量受到介质动态范围和噪声的影响要多于复用技术, 而较薄的介质 (如光致聚合物) 则不然, 所能存储全息图的数量在很大程度上由复用技术决定。经常在较厚介质中使用的角度复用技术在这里效果不大, 需要使用其它复用技术, 例如移位或旋转复用技术, 该系统采用的是散斑-移位复用技术。

4.2 美国加州理工学院的双掺杂晶体介质存储实验系统

美国加州理工学院 Demetri Psaltis 教授的光信息处理研究小组已经开发出多种全息材料和技术。

他们利用掺锰掺铁铌酸锂晶体 ($\text{LiNbO}_3\text{:Fe:Mn}$) 作为介质, 实现的全息存储具有选择性擦除和重写能力^[7]。在这种双掺杂晶体中进行记录时需要同时存在参考光束 (记录光束) 和敏化光束, 由敏化光束确定记录的范围。图 3 中敏化和参考光束通过柱面镜聚焦到存储介质, 敏化光束在焦深内使晶体产生厚度只

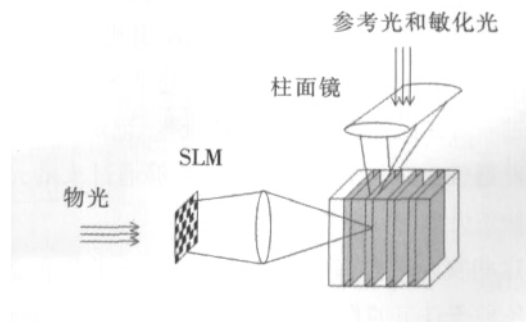


图 3 双掺杂铌酸锂晶体记录示意图

有几十微米的薄片层, 当参考光束和敏化光束移到相邻位置时即完成了复用。读出的时候, 敏化光束不再存在, 只有参考光束来完成非破坏性再现, 在 Bragg 条件下参考光束的光强可增大至 2 倍。选择性擦除可通过只用敏化光束照射希望擦除的区域来实现。在这套实验系统中, 参考光束和敏化光束一起传播并聚焦到晶体中, 局部全息图由光强相等的参考光和信号光记录以增大记录斜率, 从而使每幅全息图的记录时间达到最短。

4.3 IBM 公司 Almaden 研究中心的全息材料和系统测试平台

IBM 公司 Almaden 研究中心研制的全息光存储测试平台分别是 PRISM 和 DEMON, 其中 PRISM 测试平台主要用来进行全息数据存储材料的定量测试。高质量的存储材料应该遵循以下原则: 优良的光学性能、高记录保真度、大动态范围、低散射、高灵敏度和非易失性。PRISM 平台能够在这些标准的基础上评价期望的存储材料, 范围从光致聚合物到无机光折变材料。根据测试仪器接收的由记录材料传递到探测器的数据页图像误码率 (BER) 以及材料中全息记录再现时产生的页误码率等数据, 可以量化各种材料的光学性能和记录保真度等参数。

DEMON 平台在 LiNbO_3 晶体中利用角度复用实现了全息图叠加, 其特点包括高分辨率、SLM 和 CCD 阵列之间的像素匹配、读出过程中的准视频帧速率, 并且使用自行开发的样机和纠错编码技术。DEMON I 平台使用透射型 SLM, 采用 8~12 像素调制编码技术。它通过由 5 个透镜组成的变焦镜头成一个缩小的像, 这个 SLM 的像位于傅里叶变换透镜的前焦面上。DEMON II 平台使用反射式液晶 SLM, 具有 1024×1024 个像素, 物光在进入 SLM 前首先要经过一对柱面光学元件进行切趾^[9]。记录时所用的傅里叶透镜为短焦距透镜系统, 能够通过大的光场范围修正失真 (特别是扭曲)。

这些实验平台都可用来研究编码技术和全息系统在各种条件下的性能。例如 IBM 公司利用 LiNbO_3

作为记录介质存储视频, 并在 DEMON II 平台上实现了高数据存储密度, 同时开发了重要的光学技术以实现图像信号光束的平顶光强分布。

4.4 日本 Optware 公司的同轴式全息光盘数据存储系统

日本 Optware 公司于 2004 年 8 月正式发布了同轴式全息光存储系统 (Collinear Holographic Information Storage System)。它的最大特点是激光器发出的光经 SLM 调制成沿同一光轴传播的物光和参考光束, 如图 4 所示。

这套系统使用了 2 种波长不同的激光器, 其中

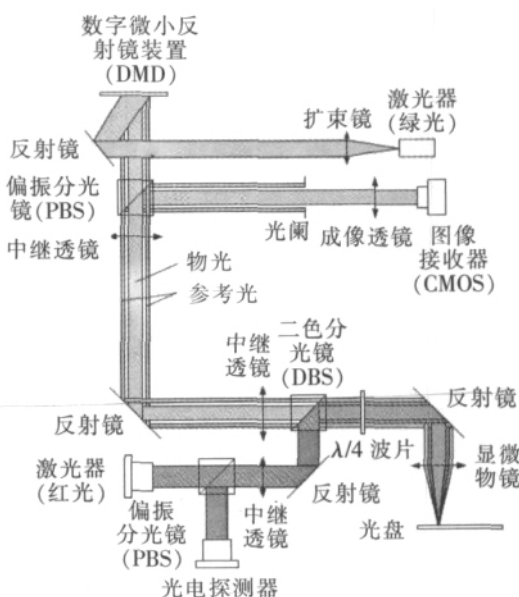


图 4 日本 Optware 公司的同轴式全息光盘数据存储系统光路示意图

波长为 532 nm 的绿光激光器用于全息图的写入和读出^[9]。写入时, 它发出的激光经扩束后投射到作为空间光调制器的数字微小反射镜装置 (Digital Micromirror Device, DMD) 上, DMD 上显示的图案是需要存储的数字信息经过编码后组成的二维数据页, 激光经图案调制成既有物光又有参考光的光束 (参考光环绕在物光周围), 并沿同一光轴传播。通过偏振分光镜 (Polarization Beam Splitter, PBS)、中继透镜 (relay lens) 以及 $\lambda/4$ 波片变成圆偏振光, 最后通过显微物镜 (objective lens) 聚焦在光盘上。读出

时, 激光经 DMD 后调制成仅保留参考光的光束, 通过和写入时相同的路径聚焦在光盘上再现信息图案, 经反射层返回显微物镜, 并依次通过 $1/4$ 波片和平移透镜, 最后被偏振分光镜反射到图像接收器 (CMOS) 中, 参考光被成像透镜前的光阑遮挡, 未能进入图像接收器中。

在写入和读出过程中, 波长为 650 nm 的红光激光器用于记录和再现过程中伺服系统控制和全息图定位。它发出的红色激光经过二色分光镜 (dichroic beam splitter, DBS) 与绿色激光一起到达光盘。

光盘采用反射式结构, 共有 6 层构成, 依次为基板、间隔层 1、二色分光反射层、间隔层 2、有机记录材料层和保护层。基板顶部有预制的沟槽, 凸起的地方镀铝反射膜, 如图 5 所示。二色分光反射层能够让红光透过并到达基板沟槽表面而使绿光直接反射, 避免了沟槽对携带记录信息的绿光产生的衍射影响。红光到达沟槽后, 在镀有铝反射膜的地方反射, 从而为记录和再现的数据进行定位。这种结构能使系统大为简化, 并且解决了与现有光盘存储系统的兼容问题。

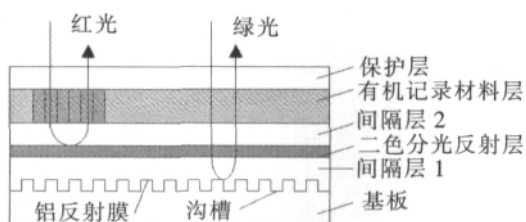


图 5 反射式光盘结构示意图

使用现有的光盘伺服控制技术可有效保持聚焦透镜与光盘间距的精确定位, 能够将全息图准确地记录在存储介质中, 并准确无误地再现而不受外界振动的影响。Optware 公司开发的这种光盘结构简化了系统并解决了与现有光盘存储系统的兼容问题。

4.5 美国 InPhase 技术公司的 Tapestry 介质存储系统和 ZeroWave 制造工艺

美国 InPhase 技术公司于 2000 年 12 月由朗讯

科技公司贝尔实验室分离成立, 通过由贝尔实验室科学家组成的研究小组开发的技术, 解决了与全息存储相关的几个基本问题, 包括存储介质的制作和全息图的记录等。InPhase 公司 (包括其前身) 对全息存储进行了 10 多年的研究, Tapestry 介质存储系统是其取得的重大成果。该系统的一个重大突破是采用了性能优良的光致聚合物作为存储介质^[10], 这也是全息光存储系统需要解决的一个关键技术。

普通记录材料只使用一种光致聚合物发生化学反应形成基质并完成全息图的记录, 一并控制记录特征、机械和制造等参数。Tapestry 介质存储系统的记录材料由 2 种性质上既相互独立又相互兼容的聚合物组成, 一种用来作为基质, 控制机械、制造和使用寿命等参数; 另一种具有光敏特性, 用于全息记录过程中, 这 2 种聚合物发生的化学反应彼此没有相互作用或干扰^[11]。双化学反应的方法使存储介质具有大动态范围、高感光灵敏度、极低的收缩性和高图像质量等优点, 并与目前光盘的制造方法相一致。InPhase 公司目前开发的 Tapestry 介质记录材料是一次写入、多次读出型, 能工作在蓝、绿和红光条件下。

InPhase 公司开发的 ZeroWave 制造工艺能够以较低成本制作高质量的光学介质, 该工艺将记录材料填充到 2 层基片中形成类似 DVD 盘片的夹层, 配合 Tapestry 介质可实现全息光存储技术的商业化。

5 结束语

全息光存储技术的发展还存在许多瓶颈, 存储介质、复用技术、编码技术以及光电器件这些关键技术依然是研究人员所面临的巨大挑战。要想使全息光存储实现低成本的商业化还有很长的路要走。但人们相信随着技术的不断发展, 这些问题必将得到解决, 全息光存储技术最终将会满足人们对信息数据存储的要求。(No.3)

参考文献

- [1] 李伟, 谢长生, 裴先登. 全息存储——下一代存储解决方案 [J]. 计算机应用研究, 2002, (4): 14- 16.
- [2] 刘继桥, 刘之景, 王克逸. 近场光学高密度存储研究进展 [J]. 自然杂志, 2002, 24(6): 330- 334.
- [3] 郑光昭. 光信息科学与技术应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 276- 284.
- [4] 吕乃光. 傅里叶光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 288- 290.
- [5] Hesselink L. Fundamental issues related to digital holographic data storage [A]. LEOS 99, IEEE [C]. Mayland USA, 1999, 1: 327- 328.
- [6] Orlov S S, Phillips W, Bjornson E, et al. Ultra- high transfer rate high capacity holographic disk digital data storage system [A]. Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, 2000, IEEE [C]. Washington DC, 2000: 71- 77.
- [7] Moser C, Psaltis D. Holographic memory with localized recording [J]. Applied Optics, 2001, 40 (23): 3909- 3914.
- [8] Ashley J, Bernal M P, Burr G W, et al. Holographic data storage [J]. IBM J. Res. Develop., 2000, 44(3): 341- 368.
- [9] Horimai H, Tan X. Holographic information storage system: today and future [J]. Magnetism, IEEE Transactions on, 2007, 43(2): 943- 947.
- [10] Dhar L. High performance recording media for holographic data storage. [A] LEOS 2004 The 17th Annual Meeting of the IEEE [C]. Puerto Rico, 2004, (2): 727- 728.
- [11] Curtis K, Wilson W, Dhar L. Commercialization of holographic storage at InPhase technologies [A]. Optical Memory and Optical Data Storage Topical Meeting 2002, International Symposium on [C]. 2002: 6- 8.