

基于 LiNbO_3 晶体的透射式共光轴体全息存储技术

李建华 曹良才* 谭小地 何庆声 金国藩

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 共光轴体全息存储是体全息存储技术实用化的一个发展方向。为了选择合适的参数以搭建基于晶体的透射式共光轴体全息存储系统, 对该系统的存储容量、串扰特性和晶体在共光轴存储结构中的存储特性等进行了研究。从理论上分析了共光轴体全息存储系统的存储密度、物镜的参数、空间光调制器的像素尺寸、有效像素数目和移位复用间隔等之间的关系, 给出了点扩展函数表达式的物理解释, 并根据点扩展函数分析了系统的串扰特性, 优化了存储偏振光方向以使晶体表现出最大的动态范围。根据分析优化结果搭建了基于 LiNbO_3 晶体的透射式共光轴体全息存储实验系统, 实现了高分辨图像的记录与再现。与传统的双轴系统相比, 所搭建的共光轴系统具有光路结构紧凑的特点。

关键词 全息; 共光轴系统; 透射式结构; 数据存储; LiNbO_3 晶体

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0409001

Transmission Type of Collinear Volume Holographic Storage Technology Based on LiNbO_3 Crystal

Li Jianhua Cao Liangcai Tan Xiaodi He Qingsheng Jin Guofan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Collinear (Coaxial) volume holographic data storage (CVHDS) is one of the promising technologies for the commercialization of the volume holographic data storage. In order to optimize the parameters for the construction of transmission type of CVHDS system, some CVHDS properties such as storage density, crosstalk characteristics and crystal storage property are investigated. The relation between the storage density of CVHDS and the parameters of objective lens, the pixel pitch of the spatial light modulator (SLM), the effective pixel number of the SLM and the shift pitch for multiplexing are theoretically derived. The physical interpretation for the expression of the point spread function is proposed. The crosstalk property is analyzed for different reference patterns based on point spread function. Then the polarization state in the photorefractive crystal is optimized for as larger dynamic range as possible. Finally, the transmission type of CVHDS system based on LiNbO_3 crystal is constructed for the data-storage experimental test. Data-storage experimental results indicate that pictures with high resolution can be recorded and reconstructed with high fidelity by this system. Compared with the two-axis geometry, the optical setup of the CVHDS system is more concise and smaller in size.

Key words holography; collinear system; transmission type; data storage; LiNbO_3 crystal

OCIS codes 050.7330; 090.7330; 210.2860; 210.2860; 210.4680; 210.4810

1 引 言

共光轴体全息存储技术具有系统结构简洁、稳定性高、并可与光盘技术兼容的优点^[1,2], 是体全息

存储技术^[3]实用化的一个发展方向, 近几年来, 受到了广泛的关注^[4~6]。实验和理论分析都证实了共光轴系统具有较好的位移选择性、较大的波长和离焦

收稿日期: 2011-10-08; 收到修改稿日期: 2011-11-14

基金项目: 国家 973 计划(2009CB72400703)和国家自然科学基金(60807005, 61177001)资助课题。

作者简介: 李建华(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事体全息存储方面的研究。E-mail: lijianhua08@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 金国藩(1929—), 男, 中国工程院院士, 博士生导师, 主要从事体全息存储、光计算及二元光学等方面的研究。

E-mail: jgf-dpi@mail.tsinghua.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: clc@mail.tsinghua.edu.cn

误差容限^[7-9],使得系统的实用化相对容易。共光轴系统中一个关键问题是页内串扰问题,很多文献采用点扩展函数对共光轴系统的串扰进行了分析并给出了点扩展函数的数值模拟计算方法和解析表达式^[10,11],但是尚未给予解析表达式清晰的物理解释。另外,共光轴存储系统所使用的存储介质一般采用只能一次性写入的聚合物材料^[12],很少有使用可重复擦写的晶体作为存储介质的。由于聚合物材料是各向同性介质,为了提高干涉效率,一般采用圆偏振光进行存储^[1,2]。与聚合物材料不同的是,晶体介电常数具有各向异性的特点,不同偏振态将表现出不同的存储效果,圆偏振光的存储效率不能得到有效发挥,必须进行存储偏振态的优化才可能得到理想的存储效果。

为了构建基于 LiNbO₃ 晶体的存储实验平台以研究共光轴存储特性,首先分析共光轴体全息存储的存储密度和页内串扰特性并给出系统构建的优化方向,同时对点扩展函数表达式的物理意义进行了阐述。然后搭建透射式共光轴体全息存储实验平台,并根据 LiNbO₃ 晶体的各向异性特性和共光轴存储结构特点优化存储偏振光方向以达到最优存储效果,最后使用该平台进行存储实验并给出实验结果。

2 共光轴体全息存储原理及容量分析

2.1 共光轴体全息存储原理

传统的全息记录都是采用双光路结构:一束光作为参考光,一束光作为信号光,因此系统一般有两个光轴,光路较复杂,稳定性差。而共光轴系统最大的特点在于系统只有一个光轴,通过将一束光的不同部分分割为参考光和信号光以达到简化系统、提高系统稳定性的目的。如图 1 所示为透射式共光轴体全息存储和再现过程示意图,光路采用 4f 存储结构。记录时,将同一个空间光调制器(SLM)的不同位置分割为信号区与参考区,由信号区和参考区产生的两部分光经过共同的物镜(lens₁)后在存储介质中相交并干涉,形成全息光栅,如图 1(a)所示。再现时,只有 SLM 的参考区上载“1”为亮,其他部分上载“0”为暗。参考光经透镜后读取存储介质,经存储介质的全息光栅衍射后得到衍射光,最后由探测器读出再现信号光信息,如图 1(b)所示。

2.2 共光轴体全息存储容量分析

体全息存储的理论存储密度很高,但是实际存储密度受诸多因素影响,比如存储介质的动态范围、散射噪声、数据页内及页间的串扰噪声等。理论存

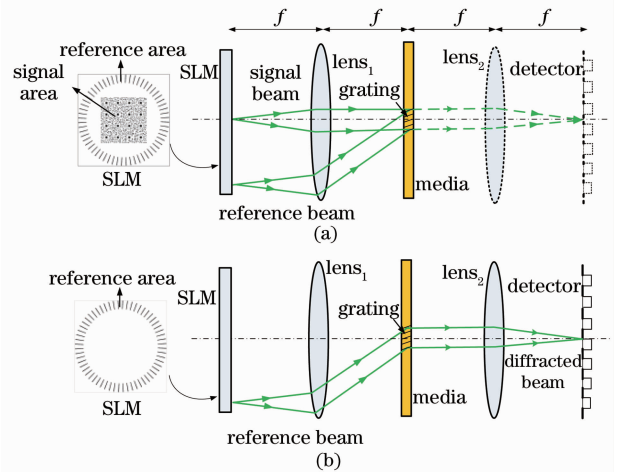


图 1 透射式共光轴体全息存储原理示意图。(a)存储过程; (b)再现过程

Fig. 1 Schematic diagram of transmission type of collinear volume holographic storage. (a) Recording process; (b) reading process

储密度高的本质是源于体全息光栅的布拉格选择性,可以在同一存储体积内复用存储多个数据页。体全息存储的体存储密度为

$$\rho_{3D} = m\rho_{2D}, \quad (1)$$

式中 m 表示体全息存储的复用数,与存储介质的厚度、记录结构等因素有关; ρ_{2D} 表示单个数据页的面存储密度。面存储密度定义为存储介质单位面积的存储比特数。对于如图 1 所示的傅里叶全息记录结构,单个数据页对应的存储面积近似为(Nyquist 孔径假设)

$$S \approx \pi(f\lambda/d)^2, \quad (2)$$

式中 f 为物镜的焦距, λ 为使用的激光波长, d 为 SLM 单个像素的尺寸。对于二值型 SLM,一个像素只能表示 1 bit 信息,此时单个数据页的总数据量为

$$C \approx \pi\left(\frac{D}{2d_p}\right)^2, \quad (3)$$

式中 D 为 SLM 使用的口径, d_p 为 SLM 像素间隔。对于常用的 SLM,其像素尺寸(10 μm 左右)远远大于使用的激光器波长(0.5 μm 左右),此时每个像素衍射对应的衍射角很小,可以认为物镜的实际使用孔径 D_1 等于 D 。假设 SLM 的填充率为 1,即 $d = d_p$,由(2)、(3)式可得单个数据页的面存储密度

$$\rho_{2D} = \frac{C}{S} = \left(\frac{D}{2f} \frac{d}{d_p} \frac{1}{\lambda}\right)^2 \approx \left(\frac{d_{NA}}{\lambda}\right)^2, \quad (4)$$

式中 d_{NA} 表示物镜的数值孔径,近似等于 $D/(2f)$ 。(4)式与光盘的面存储密度的表达式一致。将(4)式代入(1)式可知体存储密度主要取决于复用数和数值孔径以及记录波长,与 SLM 像素的尺寸及使用数目没有直接的关系。

共光轴体全息存储一般采用移位复用,其理论复用数取决于移位间隔与单个数据页对应的存储面积:

$$m = S/\delta^2, \quad (5)$$

式中 δ 为移位间隔。移位间隔的选择取决于存储介质的动态范围、系统的移位选择特性和噪声特性。系统的噪声特性与系统的各环节均有关系,比如 SLM 的对比度、存储介质的散射噪声、数据页内页间串扰和探测器的电子噪声等^[13]。对于共光轴系统,由于参考光与信号光经过同一个透镜,两者的夹角一般较小,由布拉格简并和布拉格失配引入的页内串扰十分严重^[14]。这是共光轴系统中一个关键问题,下面将重点分析。

3 共光轴体全息存储页内串扰分析

描述体全息存储系统噪声大小的指标很多,比如

信噪比和误码率。这些指标主要从最终的用户角度来评价,是综合性的指标。对于共光轴体全息存储系统,由于参考光也由 SLM 提供,其在存储介质内的强度分布为参考光模式的傅里叶变换,页内串扰特点与其他存储结构不同。目前一般使用点扩展函数来分析,将全息存储和再现过程等效于一次成像过程。在不考虑其他噪声因素并假设存储介质的响应为线性情况下,探测器探测到的再现图的光场分布为信号光模式与点扩展函数的卷积。文献[11]根据他们所提出的 VOHIL 模型^[15](即将体全息光栅沿光轴方向分割成多层面全息光栅的组合,最终得到的体全息衍射信号是每个面全息光栅衍射信号的叠加)给出旁轴近似条件下的点扩展函数的表达式

$$f_{\text{PSF}}(\xi, \eta) = \frac{\exp(jk4f)}{(\lambda f)^2} \int_{-t/2}^{t/2} \exp\left[\frac{j\pi\Delta z}{\lambda f^2}(\xi^2 + \eta^2)\right] [\delta(\xi, \eta) * f_{\text{PSFZ}}(\xi, \eta, \Delta z)] d\Delta z, \quad (6)$$

式中 t 为存储介质厚度, $f_{\text{PSFZ}}(\xi, \eta, \Delta z)$ 为每层面全息光栅衍射得到的点扩展函数,可以表示为^[10]

$$f_{\text{PSFZ}} = \left\{ U_{\text{p}}(-\xi, -\eta) \exp\left[-j\frac{\pi\Delta z}{\lambda f^2}(\xi^2 + \eta^2)\right] \right\} * \left\{ U_{\text{r}}^*(\xi, \eta) \exp\left[j\frac{\pi\Delta z}{\lambda f^2}(\xi^2 + \eta^2)\right] \right\}, \quad (7)$$

式中 $U_{\text{r}}(\xi, \eta)$ 、 $U_{\text{p}}(\xi, \eta)$ 分别为记录时和读取时的参考光模式分布。

为了分析点扩展函数的物理意义,把(7)式代入(6)式,并认为读取时的参考光模式与记录时相同,即 $U_{\text{r}}(\xi, \eta) = U_{\text{p}}(\xi, \eta)$, 进行积分变换后得到点扩展函数表达式的简化形式

$$f_{\text{PSF}}(\xi, \eta) \propto \iint U_{\text{r}}(-x_0, -y_0) U_{\text{r}}^*(\xi - x_0, \eta - y_0) t \operatorname{sinc}\left[\frac{t}{\lambda f^2}(\xi^2 + \eta^2 - \xi x_0 - \eta y_0)\right] dx_0 dy_0, \quad (8)$$

式中 sinc 函数定义为 $\operatorname{sinc} x = \sin(\pi x)/(\pi x)$ 。可以看出,点扩展函数为参考光模式受 sinc 函数调制的自相关分布。

从物理上可以这样来解释该表达式,由于采用 $4f$ 结构,参考光模式上的每一个点经过透镜后都对一束平面波,这束平面波与光轴上的点物经透镜后的平面波干涉记录了一个全息光栅,最后记录得到的光栅将是所有参考光模式上点记录全息光栅的叠加。再现时,参考光的每束平面波将读取存储介质中所有的光栅。当读取的光栅恰好是该平面波记录的光栅时,满足布拉格条件,其衍射光正好会聚在点物的理想成像位置,对应于公式中 $\xi=0, \eta=0$ 的位置。当该平面波读取其他平面波记录的光栅时,将不满足布拉格条件,其衍射光的方向将偏离理想成像位置,因此形成弥散分布。衍射光的效率与布拉格失配量的大小有关,(8)式中的 sinc 函数表达了布拉格失配带来的衍射效率下降的影响。布拉格

简并现象则对应于 $\xi \neq 0$ 或者 $\eta \neq 0$ 而 sinc 函数值等于 1 的情况。所有读取结果的叠加对应于(8)式中的积分。

可以看出,存储介质厚度 t 越大,物镜焦距 f 越小, sinc 函数调制越强,点扩展函数将会越集中,页内串扰越小,系统分辨率越大。同时,焦距的调制作用是以二次方的形式出现的,对点扩展函数分布的影响大于厚度的影响。对于物镜来说,在保持其通光口径 D 不变的情况下,焦距 f 越小,其对应的数值孔径越大。因此,在选择物镜时,尽量选择大数值孔径的物镜,一方面能提高单页数据存储密度,另一方面能够压缩点扩展函数,提高存储信噪比。由于参考光和信号光的叠加区域仅仅在焦平面附近,当叠加区域已经包含在介质里时,再增大介质厚度并不能增强调制作用。定义介质的有效厚度为信号光模式中心点和参考光模式中心点对应的平面波叠加区域的长度,如图 2 所示。图 2 中 θ_0 为参考光和信

号光的平均夹角,定义为信号光模式中心点和参考光模式中心点对应的平面波的夹角, D_N 为 Nyquist 孔径,大小为 $2f\lambda/d$,则介质的有效厚度为

$$t = \frac{2f\lambda}{d \tan \theta_0} \quad (9)$$

根据(8)式可对不同的参考光模式下的点扩展函数进行计算,选取点扩展函数最窄的参考光模式作为实际系统的模式,以提高系统的最终信噪比。分别对如图 3 所示几种文献中常用的参考光模式进行了计算,点扩展函数一维分布的仿真结果如图 4 所示。仿真过程中,每个像素采用一个点代替,仿真计算的参数均以实际系统参数为依据,具体参数值如表 1 所示。在计算中,考虑到存储介质折射率与

空气折射率的差别,焦距用 nf 代替 f ,波长用 λ/n 代替 λ ,其中 n 为存储介质的折射率。

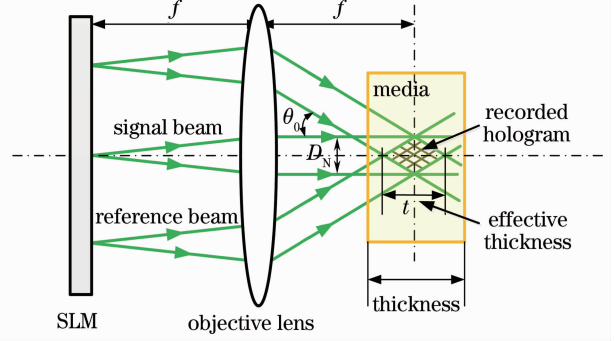


图 2 介质有效厚度计算示意图

Fig. 2 Schematic of calculation for media effective thickness

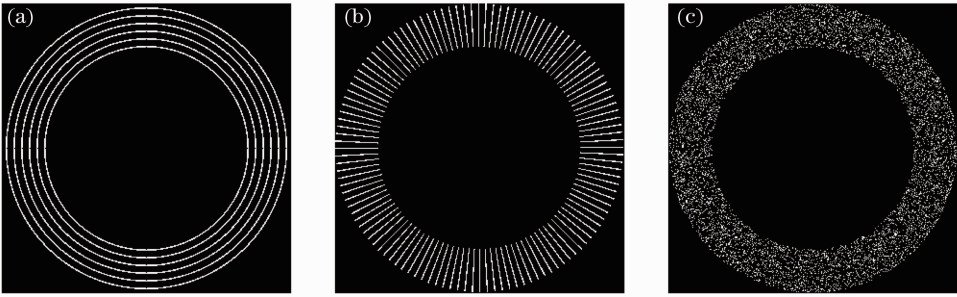


图 3 参考光模式分布图。(a)多圆环模式;(b)辐射状模式;(c)随机图模式

Fig. 3 Reference beam patterns. (a) Multiple rings; (b) radialized; (c) random

表 1 仿真计算参数

Table 1 Summary of parameters for simulation

Parameter	Quantity symbol	Value
Focal length of objective lens	f / mm	4
Wavelength	$\lambda / \mu\text{m}$	0.532
Average angle between reference beam and signal beam	$\theta_0 / (^{\circ})$	19
Media effective thickness	t / mm	1.14
Media refractive index	n	2.4
Pixel size of SLM	$d / \mu\text{m}$	10.8
Pixel number	N	301×301
Outer radius for reference patterns	R_1 / pixel	150
Inner radius for reference patterns	R_2 / pixel	105
Filling factor for reference patterns	η	3/16
Step size	$dx_0, dy_0 / \mu\text{m}$	10.8

从图 4 可以看出,在如表 1 参数情况下,随机图模式具有最窄的点扩展函数。

4 实验平台构建及实验结果

根据前面的分析,构建了如图 5 所示的共光轴体全息存储实验平台。采用半导体抽运固体激光器

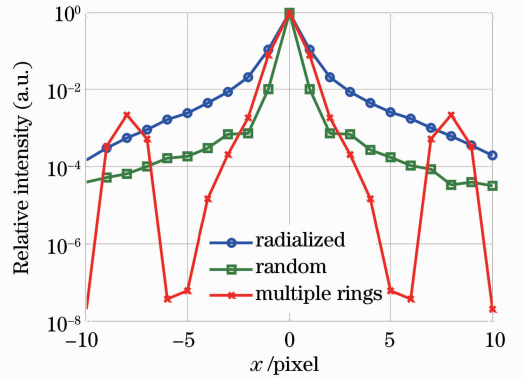


图 4 点扩展函数一维分布计算结果图

Fig. 4 Calculated result of 1D distribution of point spread function

(DPSSL)作为光源,激光器波长为 532 nm,功率为 110 mW,模式为单纵模,输出光偏振态为垂直方向线偏振光。激光器发出的光经可变衰减片(NDF)调整光强,再经针孔滤波后准直扩束为平面波。1/2波片(HWP)用于改变线偏振光的偏振方向。SLM采用高对比度的数字微镜(DMD)代替传统的液晶

SLM。采用高对比 DMD 的目的是为了降低再现数据的噪声。在体全息再现时,SLM 上载“0”的部分虽然理论上不透射(反射)光,但是实际的器件将会有少量的透射(反射)光,这部分光将会直接成像到探测器表面而作为背景噪声降低再现像的信噪比,其影响的大小取决于 SLM 的对比度。使用的 DMD 标称对比度为 1000:1,填充率为 91%。DMD 上载的模式经中继透镜成像于显微物镜的前焦面,入射到 DMD 表面的平面波光强为 97 mW/cm²。中继透镜中间的光阑用于控制记录尺寸大小。光束经显微物镜后会聚于位于物镜后焦面的存储介质中进行全息记录。存储介质采用 Fe:LiNbO₃ 晶体,尺寸为 1.6 cm×1.6 cm×2.7 cm,晶轴位于水平方向。显微物镜的数值孔径为 0.55,焦距为 4 mm。全息再现的衍射光经成像透镜成像在 CMOS 上。存储介质后面的光阑用于挡住再现时的参考光进入 CMOS 相机以实现参考光和衍射光的分离。参考光模式采用随机图模式。从实验光路图可以看到,共光轴体全息存储系统光路相对于传统双轴系统更加紧凑。

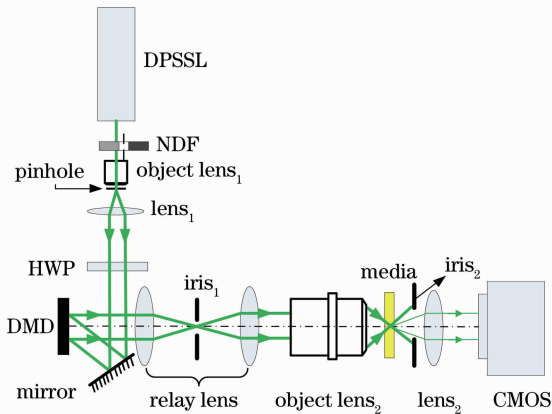


图 5 共光轴体全息存储实验光路图

Fig. 5 Setup of collinear volume holographic data storage system

4.1 存储偏振态优化

由于作为存储介质的 LiNbO₃ 晶体介电常数具有各向异性的特性,采用不同方向的偏振光记录全息图,将具有不同的存储特性。图 6 为晶体中全息记录时各矢量方向示意图。点划线表示光轴方向, C 表示晶轴的方向, \mathbf{K}_R 和 \mathbf{K}_S 分别表示参考光和信号光的波矢方向,两者与光轴的夹角均为 θ , o 和 e 分别表示晶体中的寻常光和非寻常光的偏振方向。文献[16]对光折变晶体动态范围进行了分析,得到了晶体动态范围与参考光和信号光之间的耦合常数的关系。根据耦合常数与光波的传播角度以及偏振方

向的关系,给出了晶体动态范围(M)与偏振方向以及角度变化的表达式。结合 LiNbO₃ 晶体具体参数得到如图 7 所示的晶体动态范围(M)与偏振方向以及角度变化的曲线。从曲线可以看出,晶体动态范围随着角度的增大而减小,而且晶体采用 e 光记录将比 o 光记录表现出更大的动态范围,即记录相同数量的全息图将能够得到更大的衍射效率。

对于传统基于晶体的 90°全息记录结构^[17],即 $\theta=45^\circ$ 的情况,参考光与信号光波矢互相垂直,记录偏振光必须选择 o 光才能发生干涉,而此时对应的动态范围最小,未能充分发挥晶体的存储性能。对于共光轴存储结构而言,参考光与信号光夹角较小 ($2\theta_0=38^\circ$),晶体能够表现出更大的动态范围,这是共光轴系统的一个优势。另外共光轴系统的参考光与信号光近似成轴向对称分布,采用任意方向的线偏振光进行干涉的干涉对比度一样,偏振方向的选择仅仅取决于晶体的存储特性。根据前面分析,选择 e 光进行记录可以获得更大的动态范围。

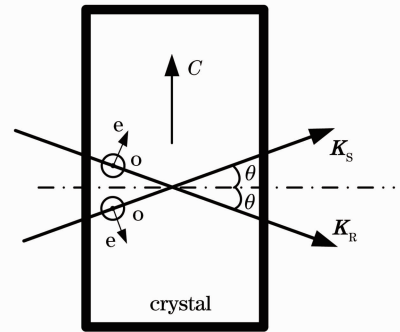


图 6 晶体中全息记录时各矢量方向示意图

Fig. 6 Schematic of vectors directions for holographic recording in crystal

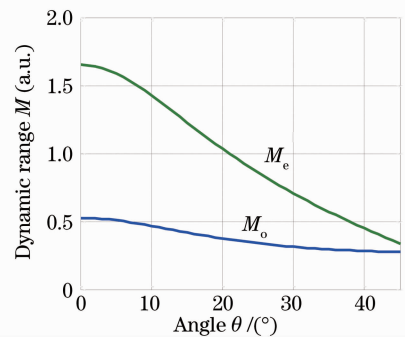


图 7 LiNbO₃ 晶体中 o 光、e 光动态范围与夹角 θ 的关系

Fig. 7 Relation between dynamic ranges in Fe:LiNbO₃ crystal and θ

4.2 存储实验结果

采用如图 5 所示的实验系统分别进行了图像存储和数据存储两组实验。旋转 1/2 波片,采用 e 光

进行干涉记录,单幅数据记录时间 20 s。图像存储结果如图 8 所示,图 8(a)为图像直接成像到 CMOS 上得到的结果,图 8(b)为全息记录后使用参考光读取得到的再现图。数据存储采用二维等重稀疏调制码进行编码^[18],数据填充率为 3/16。数据存储结果如图 9 所示。由于 DMD 振幅调制是通过控制 DMD 上的微反射镜沿对角线正负翻转实现的,因此 DMD 表面在光路中必须绕光轴旋转 45°才能保

持系统光轴在同一个水平面上,这样导致 CMOS 探测到的数据旋转了 45°,如图 9 所示。该问题可以通过后续的数据处理或者将 CMOS 表面绕光轴旋转 45°解决。从图中局部放大图可以看到 DMD 上每个像素在探测器均可以清晰再现,而且 DMD 像素间的微小间隔也能够清楚分辨。实验表明所搭建的实验系统能够有效存储并可靠再现存储数据。

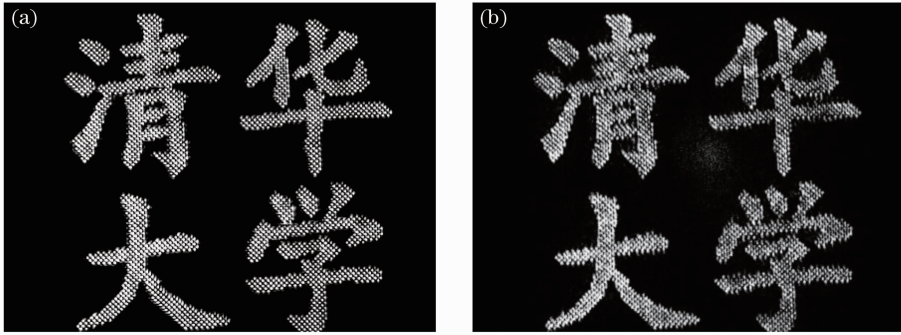


图 8 图像存储实验结果。(a)直接成像图;(b)存储再现图

Fig. 8 Experimental results for image reconstruction. (a) Imaged data page; (b) reconstructed data page

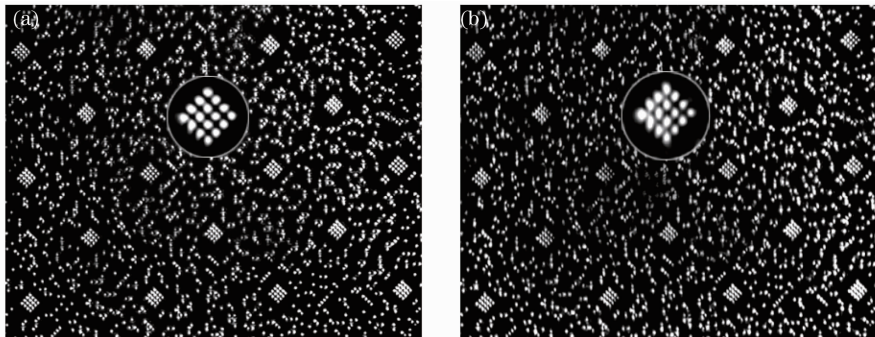


图 9 编码数据存储实验结果。(a)直接成像图;(b)存储再现图

Fig. 9 Experimental results for digital data page reconstruction. (a) Imaged data page; (b) reconstructed data page

5 结 论

采用 LiNbO₃ 晶体实现了共光轴体全息存储的记录与再现。设计并搭建了基于 LiNbO₃ 晶体的共光轴透射式体全息存储平台,并对共光轴结构下的 LiNbO₃ 晶体的动态范围进行了分析,分析表明采用 e 光存储晶体将表现出更大的动态范围。采用搭建的系统进行了不同数据类型的存储实验,实验表明,基于 LiNbO₃ 晶体的共光轴透射式体全息存储系统能够有效存储并可靠再现出高分辨率的图像。从理论上分析了共光轴体全息存储容量与器件参数的关系,分析表明对于二值型 SLM,体全息存储的单幅数据页的面存储密度与光盘的面存储密度基本一致,与 SLM 像素尺寸大小及数目没有直接关系,仅与物镜的数值孔径和记录波长有关,而总的体存

储密度与体全息存储的复用数密切相关。优化了点扩展函数解析表达式,优化后的表达式物理意义更加清晰,得到点扩展函数本质是参考光模式受 sinc 函数调制的自相关函数。从(8)式可以得到如下结论:在物镜口径一致的情况下,物镜的数值孔径越大,存储介质有效厚度越大,点扩展函数越窄,页内串扰噪声越小。

致谢 感谢日本丰桥科技大学的堀米秀嘉教授(Prof. Hideyoshi Horimai)在系统构建方面给予的支持和建议。

参 考 文 献

1 H. Horimai, X. D. Tan, J. Li. Collinear holography [J].

- Appl. Opt.*, 2005, **44**(13): 2575~2579
- 2 Tan Xiaodi, Hideyoshi Horimai. Collinear holographic information storage technologies and system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 827~830
谭小地, 堀米秀嘉. 同轴式光全息存储技术及其系统 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 827~830
 - 3 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 瑛, 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
 - 4 K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama *et al.*. Improved performance in coaxial holographic data recording [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(24): 16196~16209
 - 5 S. Yasuda. Simultaneous readout of positive and negative images for dc-removed coaxial holographic data storage [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(20): 3101~3103
 - 6 Y. W. Yu, C. Y. Chen, C. C. Sun. Increase of signal-to-noise ratio of a collinear holographic storage system with reference modulated by a ring lens array [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(8): 1130~1132
 - 7 X. Tan, H. Horimai, T. Shimura *et al.*. Collinear technology for holographic versatile disc (HVD) system [C]. *SPIE*, 2006, **6343**: 63432W
 - 8 T. Shimura, S. Ichimura, Y. Ashizuka *et al.*. Shift selectivity of the collinear holographic storage system [C]. *SPIE*, 2007, **6282**: 62820S
 - 9 J. Li, L. Cao, H. Gu *et al.*. Wavelength and defocus margins of the collinear holographic storage system [C]. *SPIE*, 2010, **7851**: 785115
 - 10 T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura *et al.*. Analysis of a collinear holographic storage system; introduction of pixel spread function [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1208~1210
 - 11 C. C. Sun, Y. W. Yu, S. C. Hsieh *et al.*. Point spread function of a collinear holographic storage system [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26): 18111~18118
 - 12 Wang Longge, Li Feitao, Zhao Lei *et al.*. Study of holographic characteristics of a photopolymer doped with TiO₂ nanoparticle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3103~3107
王龙阁, 李飞涛, 赵 磊等. 掺杂 TiO₂ 纳米颗粒的光致聚合物全息特性的研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3103~3107
 - 13 H. Gu, S. Yin, Q. Tan *et al.*. Improving signal-to-noise ratio by use of a cross-shaped aperture in the holographic data storage system [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(32): 6234~6240
 - 14 T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura *et al.*. Calculation of the pixel spread function with a simple numerical model for the collinear holographic storage system [C]. International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage, 2005. PD6
 - 15 C. C. Sun. Simplified model for diffraction analysis of volume holograms [J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(5): 1184~1185
 - 16 Li Xiaochun, Wu Minxian, Yan Yingbai *et al.*. Study of the dynamic range performance of a photorefractive crystal in a volume holographic memory [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(9): 1209~1215
李晓春, 邬敏贤, 严瑛白等. 体全息存储系统中光折变晶体动态范围的理论研究 [J]. *光学学报*, 1997, **17**(9): 1209~1215
 - 17 Shen Wenmei, Jiang Zhuqing, Cheng Guofeng *et al.*. Depth resolution of 90° geometry volume holographic imaging system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(5): 67~71
沈文梅, 江竹青, 程国峰等. 90°临面入射体全息成像系统的深度分辨率 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(5): 67~71
 - 18 H. Gu, L. Cao, Q. He *et al.*. A two-dimensional constant-weight sparse modulation code for volume holographic data storage [J]. *J. Zhejiang University-Science C (Computers & Electronics)*, 2011, **12**(5): 430~435

栏目编辑: 何卓铭