

文章编号: 0253-2239(2005)03-392-4

具有存储功能的衍射图像光刻系统的研制*

陈林森 解剑峰 陆志伟 沈雁 邵洁 汪振华 胡元

(苏州大学信息光学工程研究所, 苏州 215006)

摘要: 研制了一种在衍射光变图像器件上进行信息存储的新型数字化激光光刻系统。采用空间光调制器作图形自动输入, 双远心投影成像系统在光刻记录面上缩微图形。通过光栅干涉光学头对记录面上的微图形进行干涉调制, 使微图形上产生干涉条纹, 条纹空间频率范围为 500~1200 lp/mm。在光刻胶干版上的存储实验表明, 在衍射光变图像上的单角度存储信息密度大于 3.7 Mbit/cm²。改变干涉条纹取向、条纹间隔和需要存储的图形, 光刻系统可实现信息的旋转复用存储。上述光刻系统将会在防伪和衍射光变图像器件制造领域有良好应用。

关键词: 全息术; 光存储; 光刻; 衍射光栅; 光变图像器件

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

Fabrication of a Diffractive Image Lithographic System for Optical Storage

Chen Linsen Xie Jianfeng Lu Zhiwei Shen Yan Shao Jie Wang Zhenhua Hu Yuan

(Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou 215006)

Abstract: A novel digital laser lithographic system has been fabricated for storing optical information on the diffractive optical variable image device (DOVID). The digital input patterns on spatial light modulator (SLM) are imaged into the micro-images in the recording plane by a two tele-centric optical projection system with large reduction ratio. The micro-images are modulated by the interferential fringes with the spatial frequency range from 500~1200 lp/mm, which are generated by a grating interferential optical head in the lithographic system. The experimental results recorded on the photoresist plate show that the information storage density can be achieved over 3.7 Mbit/cm² in one direction storage. The angle rotating multiplexing optical storage can be automatically realized by inputting multiple patterns needed to be stored, at the meantime, changing the direction and spatial frequency of interferential fringes. The optical storage lithographic system is useful in the fields of optical security and fabrication of diffraction optical variable image devices.

Key words: holography; optical storage; lithography; diffraction grating; optical variable image device

1 引 言

衍射光学可变图像器件 (Diffraction optical variable image device, DOVID) 是一类新型光学图像, 具有色彩和图形可变的特点^[1]。随着数字光刻技术的发展, 在实现衍射光学可变图像器件的技术方法以及对其光学特性研究上, 已有很大进展, 如用电子束来实现衍射隐性图像的制作, 采用光存储技术进行信息的加密^[2~4]等。在诸多的光刻技术中,

单光束激光直写系统是一种灵活的、高精度的图形输出手段^[5], 但是, 如果需要在光刻近 1 μm 线对的条纹结构, 用单光束激光直写系统来获得亚微米尺寸聚焦点存在很大困难, 同时, 由于线条结构的细密程度很高, 激光直写系统光刻运行时间太长; 双光束干涉光刻^[6~9]是衍射光变图像的制作最重要输出手段, 一次光刻光点的尺寸可达 10~160 μm, 通过在光点上形成干涉条纹的方法, 实现了微米级干涉条

* 江苏省“六大高峰人才”基金资助课题。

作者简介: 陈林森(1961~), 男, 苏州大学信息光学工程研究所博士生导师, 主要从事光信息处理和数码激光图像光刻系统、器件的研究工作。E-mail: lschen@suda.edu.cn。

收稿日期: 2004-01-09; 收到修改稿日期: 2004-06-22

纹的稳定快速光刻。用该方法光刻不同结构的干涉条纹,可对衍射光线的色彩(波长)和衍射方向的进行有效控制,从而产生了色彩丰富、动感强、形式复杂的衍射光变图像,并作为主流光学防伪技术之一,在货币、护照和 ID 卡上,逐步进入工业化应用。但是,目前的衍射光变图像主要用于衍射图形的显示,光刻像素点上的光栅结构仅用于对光线的色散,信息容量很低。

随着对信息存储、处理、传输要求的日益提高,对光存储方法、材料特性^[10~12]的研究成为关注的焦点之一。本项工作目的是,在衍射光变图像上实现数字化的大信息密度的存贮光刻。我们研制了具有存储功能的新型衍射光变图像光刻系统:应用光栅干涉光学头技术、利用空间光调制器(Spatial light modulator, SLM)作为图形自动输入和双远心投影缩微光路,在光刻胶上记录了受干涉条纹调制的微图形,衍射的图像不仅由光栅像素构成,同时在微小光栅像素上还记录了微图形或微文字,从而,在衍射光变图像上实现了信息存储。与体全息存储采用光折变晶体作为记录材料不同,在我们的工作中,采用光刻胶作为记录材料,衍射图像在微观上具有浮雕结构,存储的内容具备了很好的复制能力。

2 存储型衍射图像光刻光路设计

在介绍具有存储功能的衍射光变图像光刻的光路之前,有必要先说明一下衍射光变图像光刻系统应用中所必需的功能要求。首先,系统光刻速度要求:由于系统采用逐光点光刻方式,光刻像素尺寸很小(小于 $160\ \mu\text{m}$),因此,系统必须要有较高光刻速度才能在可以接受的时间内完成运行。一般地,至少大于 20 存储像素点每秒是必要的,否则,速度太低将使存储时间过长。第二,系统光刻的稳定性要求:系统中的运动部件在以较快速度运行时,不可避免地会引起机械震动,由于记录的干涉条纹周期为 $0.83\sim 2.0\ \mu\text{m}$,光刻存储系统应该具有抗震性能。

我们用于光存储的衍射光变图形光刻系统的装置见图 1 所示,激光束通过声光调制器(Acoustic optical modulator, AOM)1 后,经扩束器 2、准直透镜 3 投射到空间光调制器 4 上,光束经空间调制后,由一个缩微光学成像系统 5 将输入图像成像到分束元件 6 上,分束元件 6 将光束分成 1:1 的二束光,用透镜组 7 将两束光会聚到记录材料 8 上,在光束的相交区形成具有精细干涉条纹的像素。这里,分束元件 6 是由一

组不同空间频率的相位光栅构成,光能量主要衍射到正负一级光上(正负一级的衍射效率 $>70\%$),空间频率变化范围 $250\sim 600\ \text{lp/mm}$,这样,经过透镜系统 7 的合束干涉后,光刻面上干涉条纹的变化范围是 $500\sim 1200\ \text{lp/mm}$,即干涉条纹周期在 $0.83\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 可调。分束元件 6 放置在精密转台 9 上,转台转动将改变干涉条纹在记录材料上的取向,由计算机软件来控制声光调制器的开关、空间光调制器的输入、精密转台和记录材料平台的移动,光刻后,最终在衍射光变图像上形成信息的存贮。

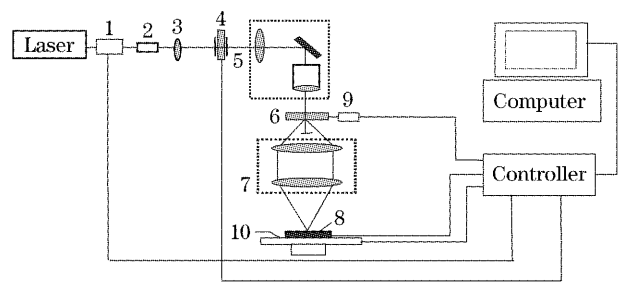


图 1 衍射光变图像的存储光刻系统示意图

Fig. 1 Diagram of DOVID optical lithographic system for optical storage

从图 1 中可以看到,光刻存储系统的优点是图形输入和干涉条纹的调整是相互独立的,同一个输入图形上,可以通过调整光栅的取向与空间频率来改变图形上的干涉条纹结构;同一组干涉条纹上也可以输入不同的图形。由于参与干涉的物光与参考光,除了光线的入射角度与记录材料的法线相互对称外,其他的特性完全相同,干涉光斑区域完全相互重叠,因此,理论上,上述光刻存储系统能够获得信噪比很好的存储图像,其上调制的干涉条纹的条纹间隔为, $d = \lambda / [2 \sin(\theta/2)]$, d 为干涉条纹周期, λ 为激光束波长, θ 为两个干涉光束的夹角。

经过缩微光学系统与光栅干涉头形成具有干涉条纹的存储像素,图 2(a)是用衍射光变图像光刻系统输出的光栅调制微图像的放大示意图,上、中两排的存储像素是不同空间频率、条纹取向的光栅像素,下排的存储像素上的文字调制有干涉条纹,图 2(b)是尺寸为 $10\ \mu\text{m}^2$ 光刻点内光栅结构($1050\ \text{lp/mm}$)的电镜照片。

如前所述,影响存储记录质量的两个主要因素是记录系统的稳定性和成像分辨力。第一,记录干涉条纹时,必须有严格稳定的记录环境(振动幅度小于 $\lambda/8$)要求,因此,干涉光路的设计非常重要。图 3(a)为光栅干涉光学头的结构图,由分束元件和合束透镜

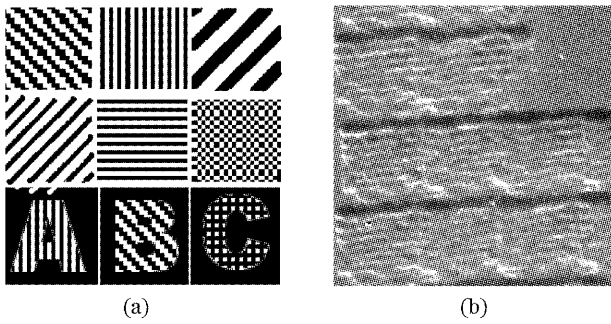


图 2 光变图像的光存储结构。(a) 干涉条纹结构,
(b) 电镜照片

Fig. 2 The optical storage structure on the DOVID
(a) Interferential fringe structure, (b) SEM photo

组构成,合束透镜组的数值孔径(NA)将决定作为分束中的体光栅最大的分束角度。专门设计 8 片透镜组的数值孔径是 0.71,所允许的光栅最大空间频率为 748 lp/mm,在光刻胶干板上形成的最小条纹间隔为 0.67 μm 。由于光束有一定的扩散,实际在光刻胶上形成的干涉条纹的最高空间频率小于 1200 lp/mm。

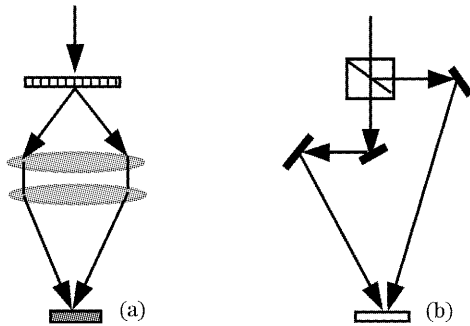


图 3 光栅干涉光学头与传统干涉光路的比较。(a) 对振动不敏感结构,(b) 对振动敏感结构

Fig. 3 Comparison of grating interferential optical head and typical interferential path. (a) Not sensitive to vibration, (b) sensitive to vibration

光刻系统中,由于分、合束元件均是透射型元件,分束光栅正负一级衍射光是对称的,环境振动(机械运动引起)的变化引起的两束衍射光的程差改变是相同的,这样,光栅在面内的平移不会影响干涉条纹定域。计算和实验均表明,即使分束光栅和透镜的上下振动达到 20 个波长,仍能获得高质量的干涉存储记录,因此,该光栅干涉光学头结构对环境振动不敏感,这是一个非常重要的优点。对比传统的干涉记录光路,参见图 3(b),使用分束镜和反射镜获得两干涉光束,这种结构在环境振动时,两个反射镜的振动不可能同步,所以,这种干涉光路对振动非常敏感,从而,该结构不能应用在快速运行大于 10 页每秒(10 pages/s)的衍射图像光刻记录系统中。

第二,分辨力是缩微投影透镜组的主要性能指标,要求透镜组有较高的像方分辨力,以利于提高衍射光变图像上的存储密度。在图 1 中,采用了双远心投影光学系统作为缩微投影透镜组,优点是系统对物像距的调节要求相对较低,有利于获得清晰的缩微图像。前组采用了焦距为 128 mm 的双胶合结构,根据不同的缩微要求,后组可采用数值孔径 NA 为 0.25、0.40 显微物镜。当在空间光调制器上实际使用的输入尺寸小于 2.0 mm 时,由于属于严格的近轴成像,上述投影透镜组实际分辨力小于 2.0 μm ,满足对光刻存储图像的分辨力要求。

3 存储系统的容量估算与实验

实验中,He-Cd 激光器(441.6 nm, Kimmon)的功率为 60 mW,声光调制器的最小开关时间为 1 μs ,系统中空间光调制器是 SONY 公司的型号为 LCX0231LT LCD, 1204 pixel \times 768 pixel,衬比度为 200:1。在实际使用光刻系统进行信息存储时,先产生两个不同文档格式的计算机文件,用“*.bmp”作为输入到空间光调制器的存储信息的文档,用自定义“*.arr”文件进行光刻位置、干涉条纹间隔、取向、旋转复用角度以及光刻时间、光刻速度等各项光学控制数据的输入。在输入数据后,整个光刻系统将在软件的控制下自动运行。

衍射光变存储系统的实际存储密度主要由光学系统的成像分辨力、记录材料复用特性和干涉记录的信噪比决定。作为估算,在存储空间区域内按位计算的总存储容量^[13]为, $N = MN_p$, N_p 是每个页面包含的数据位, M 是采用复用技术存储的数据页面数,也称复用度。光刻胶材料是平面型记录材料,角度复用存储的复用度 $M < 2$,因此,我们采用了旋转角度复用方法。空间光调制器的单元像素尺寸为 25.9 $\mu\text{m} \times 25.9 \mu\text{m}$,采用 62 pixel \times 62 pixel 来输入单元图形,空间光调制器的像素在 10 倍缩小后的尺寸为 2.59 μm ,在光刻胶干板上干涉光束的直径采用 0.16 mm 包含 62 pixel \times 62 pixel。在像面上 10 mm \times 10 mm 可以存储 3906 幅单个页面包含 3806 pixel 的数据页面,理论上在光刻胶干版上的存储密度为 $N = 3806 \times 3906 = 14.9 \text{ Mbit/cm}^2$ 。

为了提高光刻图像的品质,并考虑到输入图像数字化的影响,我们用四个数据位组成一个像素点,这样,页面内实际能分辨的数据位为 951,存储容量为 3.7 Mbit/cm²。对于文字的存储量,取决于构成

文字的像素数量, 如用 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 点来构成

文字, 则存储密度为 37000 字符每平方厘米。

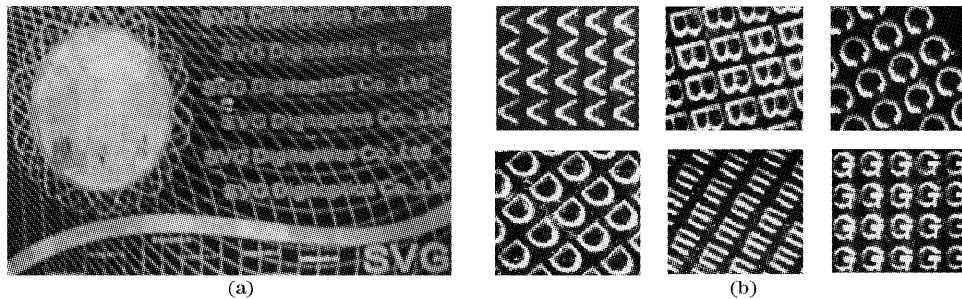


图 4 光存储实验结果。(a) 再现衍射像, (b) 在衍射光变图像上的旋转角度复用

Fig. 4 Optical storage experimental results (a) reconstructed diffractive image, (b) rotating angle-multiplexing on diffractive optical variable device

我们进行了大量的光刻存储实验, 系统非常容易达到上述存储指标。

用光刻系统制作的存储型衍射光变图像参见图 4(a), 在图像上的不同区域中的像素上, 存储了大量的文字和符号, 英文字母尺寸为 $40 \mu\text{m}$, 在 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 内能存储 625 个英文字母。图 4(b) 给出了在光刻胶干版上局部同一位置上, 采用角度旋转复用技术存储的 6 幅衍射再现图像, 从左到右、从上到下每幅图像上光栅调制角度分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ$, 存储后的衍射光变图像有很好的衬比度。实验中, 系统实际的可分辨的最小存储单元为 $5.0 \mu\text{m}$, 由于曝光和光刻显影刻蚀的作用, 曝光单元区域有轻微扩散, 同时, 由于光刻胶的动态记录范围很小, 精确的光刻时间控制是非常必要的。

当然, 最终在衍射光变图像上存储信息的质量受到空间光调制器的品质、成像系统的分辨力、分束元件的分束质量以及控制系统精度的影响。

4 结 论

目前, 在光刻胶干版上的存储实验表明, 在衍射光变图像上, 单角度存储密度达 3.7 Mbit/cm^2 , 衍射英文字母尺寸为 $40 \mu\text{m}$, 存储的信息可复制, 能广泛用于各种复制条件下的工业化生产, 如光盘、印刷、烫金材料、激光防伪和衍射器件制造等行业, 相关存储技术将在国家有关部门和行业中得到良好的应用。

进一步改进系统的光学设计的措施有, 增大前组物镜的焦距、采用数值孔径为 0.65 的显微物镜, 同时选用更小像素尺寸的空间光调制器, 将有望在衍射光变图像上获得更高存储密度和存储质量。

参 考 文 献

1 Andreas Schilling, Rene Staub, Wayne R. Tompkin. Achromatic

features for optically variable devices[J]. *Proc. SPIE*, 2002, **4677**: 238~246

2 John Drinkwater, Zbynek Ryzi, Chris Outwater. A new flexible origination technology based on electron beam lithography and its integration into security devices in combination with covert features based on DNA authentication[J]. *Proc. SPIE*, 2002, **4677**: 203~214

3 J. E. Bullema, A. H. van Krieken, M. van den Hurk *et al.*. Direct write method to create DOVIDs in metal surfaces[J]. *Proc. SPIE*, 2002, **4677**: 175~181

4 Xiaodi Tan, Osamu Matoba, Tsutomu Shimura *et al.*. Secure optical storage that uses fully phase encryption[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(35): 6689~6694

5 Jose Ramon Salgueiro, Juan Felix Roman, Vicente Moreno. System for laser writing to lithograph masks for integrated optics [J]. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(4): 1115~1123

6 L. Luciani, M. Casini. Multiple level technique for high resolution OVDs fabrication[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **3956**: 298~304

7 Sheng-Lih Yeh, Shyh-Tsong Lin, Dot-matrix hologram with hidden image[J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(2): 314~318

8 Fan Li, Chen Linsen. Method for holographic storage using optical variable device[J]. *Laser and Infrared*, 2003, **33**(4): 297~300 (in Chinese)

樊 莉, 陈林森. 一种利用光变图像光刻系统的存储方法[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(4): 297~300

9 Chen Linsen, Xie Jianfeng, Wang Zhenhua *et al.*. Optical information storage using optical variable image [P]. *Chinese Patent*, 02113112.0, 2002 (in Chinese)

陈林森, 解剑锋, 汪振华等. 利用光变图像的光学存储方法[P]. 中国专利, 02113112.0, 2002

10 Wei Jiagsong, Ruan Hao, Shi Hongren *et al.*. A novel approach to super resolution pits readout[J]. *Acta Sinica Optica*, 2003, **23**(5): 526~528 (in Chinese)

魏劲松, 阮 昊, 施宏仁等. 一种新的超分辨记录点的读出技术 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 526~528

11 Zhou Yan, Tao Shiquan, Wang Dayong. Pattern recognition algorithms based on volume holographic image-databases [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **29**(6): 359~362 (in Chinese)

周 雁, 陶世荃, 王大勇等. 基于体全息图像库的模式识别算法 [J]. *中国激光*, 2002, **29**(6): 359~362

12 Wan Yuhong, Yuan Wei, Liu Guoqing *et al.*. Study on the characteristics of scattering noise in photorefractive holographic storage[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(6): 529~532 (in Chinese)

万玉红, 袁 韡, 刘国庆等. 光折变晶体全息存储中散射噪声特性的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6): 529~532

13 Tao Shiquan. *Optical Holographic Storage* [M]. Beijing: Beijing Industrial University Press, 1998 (in Chinese)

陶世荃. 光全息存储[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1998