

文章编号:1002-2082(2007)05-0598-05

# 固体浸没透镜用于飞秒三维光存储研究

贺锋涛<sup>1</sup>, 程光华<sup>2</sup>, 郝爱花<sup>1</sup>, 时 坚<sup>1</sup>

(1. 西安邮电学院 电子与信息工程系, 陕西 西安 710061;

2. 中科院西安光学精密机械研究所 瞬态光学技术国家重点实验室, 陕西 西安 710068)

**摘 要:** 为进一步提高光存储密度, 利用固体浸没透镜(SIL)与数值孔径为0.55的长工作距离物镜对飞秒激光脉冲进行聚焦, 完成了PMMA及石英介质上的存储实验, 并对聚焦物镜焦点与SIL底面离焦时的介质内焦点位置和系统的数值孔径进行了模拟。实验结果表明: 当聚焦物镜焦点与SIL底面适当离焦时, 实际聚焦在介质内的焦点深度不断加深, 且系统的有效数值孔径不断增大。利用这一结果, 在距PMMA表面20  $\mu\text{m}$ 的地方得到了点间距1  $\mu\text{m}$ , 层间距2.5  $\mu\text{m}$ 的6层空间点阵; 在距石英介质表面15  $\mu\text{m}$ 的地方获得了点间距为0.6  $\mu\text{m}$ , 层间距为2.5  $\mu\text{m}$ 的5层空间点阵, 其存储密度可达 $1.1 \times 10^{12} \text{ bits/cm}^3$ 。

**关键词:** 飞秒激光; 固体浸没透镜; 三维光存储

中图分类号: TN249-34

文献标志码: A

## Application of solid immersion lens to three-dimensional optical storage with femtosecond laser

HE Feng-tao<sup>1</sup>, CHENG Guang-hua<sup>2</sup>, HAO Ai-hua<sup>1</sup>, SHI Jian<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic and Information Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710061, China; 2. State Key Lab of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** Solid immersion lens (SIL) was employed to increase the optical writing density. The position of foci and numerical aperture of the focusing system with SIL were simulated, and the three-dimensional optical data storage was conducted. The simulation result shows that the depth actually focused into the media is increased and the effective numerical aperture is enlarged with the suitable off-focus distance between the foci of focusing objectives and the bottom plane of SIL. With this result, a SIL with  $n=1.55$  was positioned under a 0.55 NA micro objective to focus a 150 fs Ti:sapphire pulse laser at 800 nm, and a 5-layer reading and writing of data were achieved with 2.5 mm separation between two layers and 0.6 mm separation between two bits. Accordingly, the storage density of  $1.1 \times 10^{12} \text{ bit/cm}^3$  was obtained in this way.

**Key words:** femtosecond pulse laser; solid immersion lens; three-dimensional optical storage

## 引言

飞秒激光技术的发展不仅直接带动了若干重要学科的研究进入微观超快领域, 使人们可以在飞秒时间分辨率下研究物理、化学和生物学等学

科中的各类瞬态动力学过程, 而且使人们可以在很低的脉冲能量下获得极高的峰值光强。由于飞秒激光脉冲持续时间极短, 激光照射区的能量难以通过热扩散途径扩散出照射区, 从而使激光与

收稿日期: 2007-03-15; 修回日期: 2007-04-10

作者简介: 贺锋涛(1974—), 男, 陕西人, 博士, 主要从事近场光学和高密度光存储方面的研究工作。E-mail: hefengtao@tom.com

物质相互作用的范围被严格限定, 即热影响区很小。对于透明材料, 飞秒激光的吸收借助于双光子或多光子的吸收过程实现, 由于双光子吸收与光强的平方成正比, 且吸收过程只发生在焦点处很小的体积内。基于以上原因, 飞秒激光技术在许多领域有着重要的应用价值, 如超精细加工、微光子器件制造、医学精密手术等。

近年来, 一些研究者利用飞秒激光脉冲对透明介质中多层光数据存储进行了研究<sup>[1-3]</sup>。飞秒激光三维多层体存储技术是利用高功率飞秒激光脉冲在透明介质内部进行高密度三维光存储的。由于透明材料对飞秒激光的吸收是双光子或多光子的吸收过程, 且吸收过程只发生在焦点处很小的体积内。相对于长脉冲和连续波激光来说, 超短激光脉冲几乎不会产生热作用区域和热损伤, 但能改变介质的局部物理结构, 故用飞秒激光三维存储技术可获得很高的存储密度。而本文是将固体浸没透镜(SIL)用于飞秒激光三维光存储, 将SIL与聚焦物镜相结合, 可极大地提高系统聚焦物镜的数值孔径, 缩小飞秒激光聚焦区域, 从而实现更高的体存储密度。

## 1 固体浸没透镜飞秒激光三维光存储实验装置

本文用数值孔径为0.55的长工作距离物镜将飞秒激光脉冲聚焦到SIL(SIL近贴记录介质)上。为方便调整SIL的位置并使其随Z轴上下移动, 用硬盘上的悬臂将透镜和一个三维手动平台连接。记录介质横向平移时, SIL保持不动, 而记录介质上下移动时, SIL也随记录介质上下移动。实验装置示意图如图1所示。实验采用的激光光源是钛宝石激光再生放大器, 其波长为800 nm, 脉冲宽度为100 fs, 重复频率(0~1 000) Hz可调, 平均功率为800 mW, 同时该激光光源具有手动触发功能。在

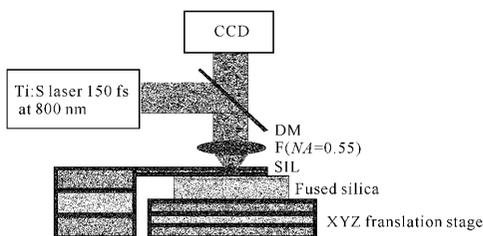


图1 SIL 三维光存储装置

Fig. 1 3-D optical storage setup with SIL

飞秒三维光存储中, 要求输出的单脉冲能量大于 $10 \mu\text{m}$ , 脉宽约150 fs, 光束质量好, 体积小。由于要求放大能量比较小, 为了减小放大系统的体积, 采用直接将种子光注入放大器, 而不对种子光进行展宽的思路。依靠放大器内各器件及隔离器等元件自身的啁啾色散来对种子光进行展宽。

## 2 固体浸没透镜飞秒激光三维光存储监视和读出系统

由于将SIL用于飞秒三维光存储后, 存储点极大缩小, 为了监视存储记录过程和SIL光存储结果, 必须提高显微监视系统的光学分辨率。在监视系统中, 将SIL与长工作距离物镜相结合, 以提高观测时系统的数值孔径, 其原理与信息写入时SIL的作用相同, 同时采用405 nm紫光发光二极管照明, 使得显微监视系统的分辨率优于400 nm。记录物镜和CCD相连, 通过监视器或计算机(带PC卡及软件)进行最终观察。图2是监视和读出系统的示意图。由于飞秒脉冲聚焦到透明介质上, 极高的峰值功率密度会导致自聚焦现象; 而照明光不会有自聚焦, 因此, 记录光和监视系统照明光不共焦, 导致监视器上的图像不清晰。每次都得通过改变介质的位置才能看到清晰的图像。

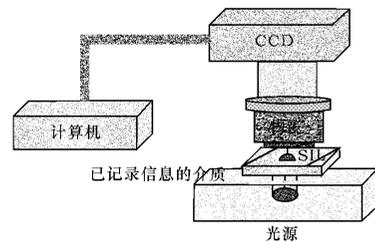


图2 三维光存储检测系统

Fig. 2 Testing system of 3-D optical storage

## 3 固体浸没透镜在飞秒激光三维光存储中的作用

当入射光束的汇聚角度和SIL材料折射较小时, 使用SIL并不会在其底面产生倏逝场。这时SIL底面产生的光场为传播场, 可利用这种光场进行三维存储。在飞秒激光三维存储中, 使SIL近贴记录介质, 当物镜焦点与SIL底面产生一定的离焦量时, 小的离焦量可使光束在SIL球冠上的入射角产生较大变化, 从而使焦点在轴上产生移动。SIL底

面的出射角即汇聚在存储介质内的汇聚角增大,从而提高了系统的有效数值孔径,并使得 SIL 在增大系统有效数值孔径的同时实现了三维存储(见图 3 所示)。在一定离焦量的情况下,分析了 SIL 对系统有效数值孔径及聚焦点位置的影响。

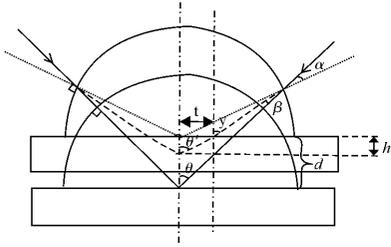


图 3 SIL 飞秒三维存储原理

Fig. 3 The principle of femtosecond 3-D storage of SIL

如图 3 所示,当物镜焦点与 SIL 底面产生一定的离焦量  $d$  时,设物镜汇聚光束入射到 SIL 的入射角为  $\alpha$ ,则据几何关系及斯涅耳定律可得

$$\gamma = \theta + \beta \tag{1}$$

$$\beta = \alpha - \arcsin(\sin \alpha / n_{\text{SIL}}) \tag{2}$$

$$\frac{R}{\sin \theta} = \frac{d}{\sin \alpha} \tag{3}$$

当光束从 SIL 底面出射聚焦到存储介质时,系统的有效数值孔径  $NA$  为

$$NA = n_{\text{介质}} \sin \theta' = n_{\text{SIL}} \sin \gamma \tag{4}$$

由(1)~(4)式可得

$$NA = n_{\text{SIL}} \sin \left[ \arcsin \left( \frac{d \sin \theta}{R} \right) - \arcsin \left( \frac{d \sin \theta}{n_{\text{SIL}} R} \right) + \theta \right] \tag{5}$$

式中:  $n_{\text{介质}}$  是记录介质的折射率;  $n_{\text{SIL}}$  是 SIL 材料的折射率,本文采用 K9 玻璃材料,折射率为 1.516;  $R$  是 SIL 的半径,值为 0.750 mm;  $\sin \theta$  是长工作距离物镜在空气中的数值孔径,其值为 0.55。系统的数值孔径  $NA$  与离焦量关系曲线如图 4 所示。

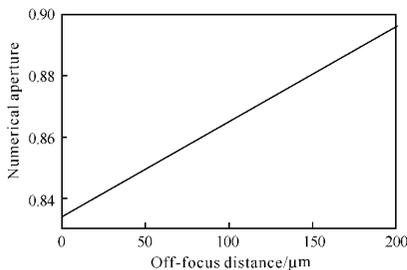


图 4 离焦量  $d$  与系统数值孔径的关系曲线

Fig. 4 Defocusing range  $d$  versus  $NA$

为了计算 SIL 离焦后实际聚焦点距 SIL 底面的距离  $h$ , 据几何关系有:

$$\left. \begin{aligned} \frac{R}{\cos \gamma} &= \frac{t}{\sin \alpha / n_{\text{SIL}}} \\ t &= h \tan \theta' \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

由(3)~(6)式可得

$$h = \frac{R \sin \alpha}{n_{\text{SIL}} \tan \theta' \cos \gamma} = \frac{d \sin \theta \sqrt{1 - (NA/n_{\text{介质}})^2}}{n_{\text{SIL}} \cos(\arcsin(NA/n_{\text{SIL}})(NA/n_{\text{介质}}))} \tag{7}$$

通过(7)式可作出离焦量与存储介质内实际聚焦点深度的关系曲线(见图 5 所示)。图中实线为石英介质时离焦量与实际聚焦点深度的关系曲线;点线为空气时的关系曲线。

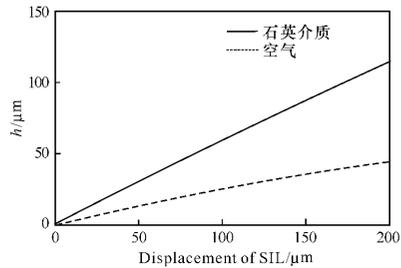


图 5 离焦量  $d$  与存储介质内实际聚焦点深度  $h$  的关系曲线

Fig. 5 Defocusing range  $d$  versus actual focus depth  $h$  within storage medium

从图 4 和图 5 可以看出,随着物镜焦点与 SIL 底面离焦量  $d$  的增加,实际聚焦点在介质内的深度不断加深,系统的有效数值孔径在不断增大。利用 SIL 这一特点,实现了在大数值孔径下的飞秒三维光存储。

#### 4 固体浸没透镜飞秒激光三维光存储实验及结果

利用 SIL 与数值孔径为 0.55 的长工作距离物镜将飞秒激光脉冲聚焦到记录介质上。SIL 近贴记录介质,将记录介质放在一个三维移动平台上。该平台在  $X$  方向的精度为 100 nm/步;  $Y$  方向的精度为 125 nm/步;  $Z$  方向的精度为 7 nm/步。速度从 (1 000~320 000)步/s 连续可调,且平台速度、位置、加速度等都可以用软件控制。由于硬盘上的悬臂将 SIL 和一个三维手动平台连接,当记录介质平移时,因悬臂弹力作用, SIL 始终近贴样品表面且在水平方向保持不动,因此保证 SIL 在每层大面

积存储时始终与物镜同轴。而记录介质上下移动时,SIL也随记录介质上下移动,用于控制离焦量及实际聚焦焦点深度,从而实现飞秒激光大面积三维存储。

采用半球形SIL在PMMA内部进行三维记录实验。实验中,利用中性衰减片将激光脉冲能量控制在(30~100)nJ之间,当激光能量低于40nJ时,信息点对比度较低,系统不能清楚分辨出信息点。但在激光脉冲能量30nJ时,仍能在PMMA表面记录信息点,只是对比度较差,因此认为PMMA的记录阈值约为30nJ。图6为采用单脉冲激光能量50nJ时的存储结果,相邻2个信息点的点间距为1 $\mu\text{m}$ 。

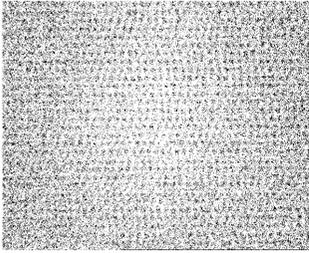


图6 SIL在PMMA上聚焦150 fs激光脉冲存储的正面图

Fig. 6 The top view of the bits recorded in PMMA with 150 fs laser focused by SIL

在相同聚焦条件下,利用115nJ飞秒激光脉冲在熔融石英玻璃内部进行记录实验,图7为记录过程中等离子体所产生的白光光斑图样。图8和图9分别是存储结果的正面图和侧面图,其点间距为0.6 $\mu\text{m}$ ,层间距为2.5 $\mu\text{m}$ ,共记录了5层。经依次计算,存储密度可以达到 $1.1 \times 10^{12}$  bits/cm<sup>3</sup>。该结果与文献[5]中报道的存储密度 $0.5 \times 10^{12}$  bits/cm<sup>3</sup>(该实验所用聚焦物镜的数值孔径为0.85,记录脉冲能量为400nJ,脉宽为150fs)相比提高了1倍多。除图9外,以上所有结果都是在加入SIL且采

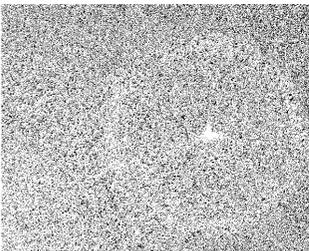


图7 飞秒激光脉冲在石英内部等离子体中所产生的白光光斑图样

Fig. 7 A white light spot produced by femtosecond laser in plasma within silica

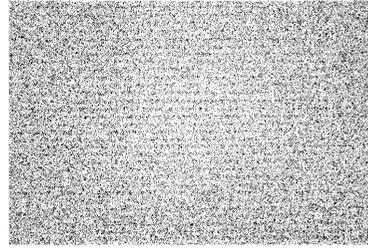


图8 SIL聚焦150 fs激光脉冲在石英上存储结果的正面图

Fig. 8 Top view of recording bits produced inside fused silica by 150 fs laser focused with SIL

用紫光照明情况下监视系统所得到的结果。采用SIL进行记录时,必须保证SIL聚焦焦点与石英表面有一定距离。当焦点在石英表面或其附近时,由于SIL与石英表面近贴,在飞秒激光与石英介质相互作用时会产生材料的飞溅,从而导致SIL的损伤。同时当聚焦点聚焦在SIL内部时,也会引起SIL的损伤。

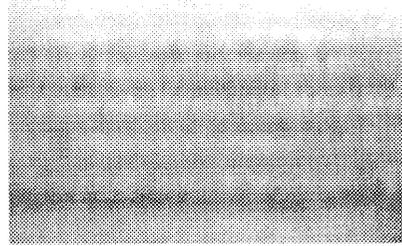


图9 SIL聚焦150 fs激光脉冲在石英上5层存储结果的侧面图

Fig. 9 The side view of the 5-layer recording bits produced inside fused silica by 150 fs laser focused with SIL

## 5 结束语

本文利用SIL与数值孔径为0.55的长工作距离物镜对飞秒激光脉冲进行聚焦,分别在PMMA及石英介质上进行了存储实验。对聚焦物镜焦点与SIL底面离焦时介质内焦点位置和系统的数值孔径进行了模拟。结果表明:当聚焦物镜焦点与SIL底面适当离焦时,实际聚焦在介质内的焦点深度不断加深,且系统的有效数值孔径不断增大。利用这一结果,在距PMMA表面20 $\mu\text{m}$ 的地方得到了点间距1 $\mu\text{m}$ ,层间距2.5 $\mu\text{m}$ 的6层空间点阵;在距石英介质表面15 $\mu\text{m}$ 的地方获得了点间距为0.6 $\mu\text{m}$ ,层间距为2.5 $\mu\text{m}$ 的5层空间点阵,其存储

密度可达  $1.1 \times 10^{12}$  bits/cm<sup>3</sup>。

#### 参考文献:

- [1] KAWATA Y, NAKANO M, LEE S C. Three-dimensional optical data storage using three-dimensional optics [J]. *Opt. Eng.*, 2001, 40 (10): 2247-2254.
- [2] GLEZER E N, MILOSAVLJEVIC M, HUANG L. Three-dimensional optical storage inside transparent materials [J]. *Optics Letters*, 1996, 21 (24): 2023-20125.
- [3] QIU J R, MIURA K, INOUE H. Three-dimensional optical storage inside a silica glass by using a focused femtosecond pulsed laser [J]. *Nuclear Instrumenss and Methods in Physics Research: B*, 1998, 141: 699-703.
- [4] 张东玲, 贺锋涛, 冯晓强, 等. 高分辨率蓝光光学显微测量系统[J]. 2005, 26(3): 57-59.
- ZHANG Dong-ling, HE Feng-tao, FENG Xiao-qiang, et al. A High-resolution optical micro-survey system with blue illumination source[J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26 (3): 57-59. (in Chinese)
- [5] CHENG Guang-hua, WANG Yi-shan, WHITE J D, et al. Demonstration of high-density three-dimensional storage in fused silica by femtosecond laser pulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(3): 1304-1307.

## 印度为其陆军山地师配备夜视设备

2007年5月前后,印度国防部报道称,以色列星夜技术有限公司的子公司(新诺加光线有限公司)赢得印度国防部2500万美元的订单,为印度陆军2个山地师提供更多的夜视装备。印度国防部称:“虽然几乎所有的前线部队和参加镇压叛乱的部队都已装备了夜视设备,但根据陆军估计,为了装备剩下的部队依然需要花费5亿多美元”。

2006年11月,新诺加光线有限公司已经赢得印度陆军950万美元的订单,而该公司2006年的总销售额也仅为1425万美元。据以色列一家媒体称,此次订单的供货期超过2年,新诺加光线公司现正与印度当局商谈开始交付日期。然而另一家媒体称,到2008年中期,这家以色列公司将只完成合同项目的35%。如果能够找到合适的本地合作伙伴,新诺加光线有限公司有望在印度军用夜视装备市场上站稳脚跟。

(昌 强)