

文章编号: 0253-2239(2006)03-0443-4

折射率失配对双光子三维光存储中像差的影响*

蔡建文 程晔增 沈兆龙 江 兵 唐火红 黄文浩

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 合肥 230026)

摘要: 双光子吸收三维光信息存储是实现高密度光存储的重要方法。三维数据写入过程中光束需经过两层不同的介质(如空气和存储材料),对像差和存储效果产生很大的影响,因此在理论和实验上分析系统各项光学参量对折射率失配引起的像差和存储效果的影响具有很大的意义。首先建立光学存储系统模型,在平行平板条件下,利用波像差函数推导展开,获得五项初级(赛德耳)像差,即球差、彗差、像散、场曲、畸变,然后对于存储材料在水平和倾斜两种情况下对初级像差进行模拟计算与分析,理论模拟与实验表明:物镜的数值孔径越大,像差随着存储深度增加而增大的速度就越快。

关键词: 信息光学; 三维光存储; 双光子; 像差; 折射率失配

中图分类号: TQ591 文献标识码: A

Influence of Refractive Index Mismatch on the Optical Aberration in Two-Photon Three-Dimensional Optical Data Storage

Cai Jianwen Cheng Yezeng Shen Zhaolong Jiang Bing Tang Huohong Huang Wenhao

(*Precise Machinery and Precise Instrument Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

Abstract: Two-photon three-dimensional optical data storage is an effective method for high-capacity data storage. The beam of light passes through two different media (such as air and storage material) in writing three-dimensional information and influences the optical aberration and storage effect. So it is important for analysing the effect of each optical parameter of system on the optical aberration and storage impression of refractive index mismatch in the theory and experiment. First, the model of the optical storage system is set up, in the condition of the parallel flat and via wave aberration function deducing, the five primary Seidel aberrations: spherical aberration, coma, astigmatism, field curvature, and distortion, are gotten, and simulations and analyses on the primary aberration in the two case of horizontal and tilted storage material are performed. Simulation and experiment proved that the slope of optical aberration increased with the increase of storage depth; if numerical aperture got bigger optical aberration augmented quicklier.

Key words: information optics; three-dimensional optical data storage; two-photon; optical aberration; refractive index mismatch

1 引 言

随着信息技术的发展,人们对数据存储容量的需求越来越大。传统的二维光存储(如 CD 和 DVD)是将信息点存储在介质的表面,在衍射效应的制约下,光存储点的尺寸大约只能降低到记录光波波长的一半,这限制了存储密度的进一步提高,所以目前这种存储方式几乎达到了极限。1989 年,美国科学家 Rentzepis 提出了用双光子吸收的方法实

现三维光存储,三维光存储能将二维光存储的存储密度提高 2~4 个数量级,从而得到广泛的关注^[1~6]。这种方法主要是在二维光盘的基础上将数据存储扩展到三维空间,并且可以利用双光子吸收有效地解决层与层之间的相互干扰问题,从而提高多层之间的抗干扰能力。对于与入射光强成线性关系的单光子吸收激发,垂直光传输方向的每一层吸收相同的能量,每层的净激发与该层离焦点的距离

* 国家自然科学基金(50275140, 50335050)资助课题。

作者简介: 蔡建文(1978~),男,江苏常州人,中国科学技术大学博士研究生,主要从事双光子三维光信息存储的研究。

E-mail: cajw@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2005-05-23; 收到修改稿日期: 2005-08-08

无关。因此,线性激发强烈干扰了需要存储信息的焦平面层的上下层。然而,对于依赖强度平方的双光子吸收激发,每层的净激发与该层离焦点距离的平方成反比。因此,能够将信息写到某一特殊的焦平面层而不会严重干扰超过瑞利范围的邻近层。在读出过程中采用共焦小孔,因此非焦面的荧光将被共焦小孔阻挡,只有焦平面上的荧光被收集。

三维数据写入过程与二维存储明显不同的是光束需经过两层不同的介质(如空气和存储材料),由于两层介质的折射率不同,存储点的强度分布与在单一介质中的分布有明显的区别。本文对光学存储系统进行模型建立,分析了由于折射率失配,光学存储系统中各项光学参量对像差和存储效果的影响。

2 折射率失配引起的像差计算及分析

在双光子三维光信息存储过程中,光束需经过两层不同的介质(如图1所示),即空气和存储材料,由于两种介质具有不同的折射率,存储材料的折射

率为 n ,从而导致信息存储点从 P 移动到 P_1 ,理想成像点深度为 d_0 ,由折射率失配引起后的成像深度为 d ,由计算可以得到

$$d = n \times d_0, \quad (1)$$

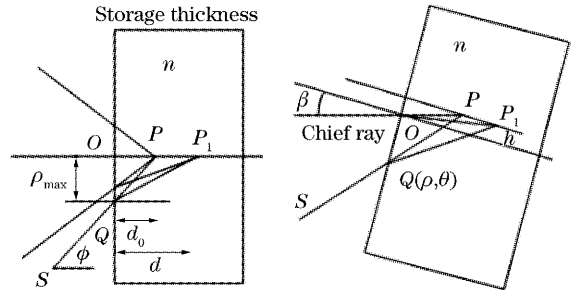


图1 光通过两层介质的聚焦路径。(a)存储介质水平, (b)存储介质倾斜

Fig. 1 Diagram of light being focused through two media.

(a) Horizontal media, (b) tilted media

从图1可以看出仿轴光线在出瞳口上的最大半径为 ρ_{\max} ,入射角为 ϕ ,光线 SQP_1 与出瞳窗口的交点 Q 坐标为 (ρ, θ) ,通过波像差函数推导可以得出^[7]

$$W(x, y; \eta) = \frac{1}{8} S_1 \frac{(x^2 + y^2)^2}{h_p^4} + \frac{1}{2} S_2 \frac{y(x^2 + y^2)}{h_p^3} \cdot \frac{\eta}{\eta_{\max}} + \frac{1}{2} S_3 \frac{y^2}{h_p^2} \cdot \frac{\eta^2}{\eta_{\max}^2} + \frac{1}{4} (S_3 + S_4) \frac{(x^2 + y^2)}{h_p^2} \cdot \frac{\eta^2}{\eta_{\max}^2} + \frac{1}{2} S_5 \frac{y}{h_p} \cdot \frac{\eta^3}{\eta_{\max}^3}, \quad (2)$$

上式五项依次分别代表初级(赛德耳)像差:球差、彗差、像散、场曲、畸变, x, y 为任一出瞳窗口上的坐标,通过对(2)式作极坐标变换,可以得到

$$W(\rho, \theta; \eta) = \frac{1}{8} S_1 \frac{\rho^4}{h_p^4} + \frac{1}{2} S_2 \frac{\rho^3 \cos \theta}{h_p^3} \cdot \frac{\eta}{\eta_{\max}} + \frac{1}{2} S_3 \frac{\rho^2 \cos^2 \theta}{h_p^2} \cdot \frac{\eta^2}{\eta_{\max}^2} + \frac{1}{4} (S_3 + S_4) \frac{\rho^2}{h_p^2} \cdot \frac{\eta^2}{\eta_{\max}^2} + \frac{1}{2} S_5 \frac{\rho \cos \theta}{h_p} \cdot \frac{\eta^3}{\eta_{\max}^3}, \quad (3)$$

其中 h_p 为出瞳口上最大入射高, η 为像高, η_{\max} 为最大像高,

$$n_0 = 1, \quad \eta_{\max} = \rho_{\max} = h_p,$$

$$N_A = n_0 \sin \phi = \sin \left[\arctan \left(\frac{h_p}{d_0} \right) \right] \approx \frac{h_p}{d_0} = \frac{nh_p}{d}, \quad (4)$$

其中 N_A 为数值孔径,由(4)式可以得到

$$h_p = \rho_{\max} = d_0 \cdot N_A = d \cdot N_A / n, \quad (5)$$

由平行平板条件可得出^[7]

$$\begin{cases} S_1 = -\frac{n_0(n^2 - 1)}{n^3} u^4 d; & S_2 = \frac{\bar{u}}{u} S_1; \\ S_3 = \left(\frac{\bar{u}}{u} \right)^2 S_1; & S_4 = 0; & S_5 = \left(\frac{\bar{u}}{u} \right)^3 S_1, \end{cases} \quad (6)$$

由图1可得

$$u = h_p / d_0; \quad \eta = d_0 \tan \beta, \quad (7)$$

设 $m = \rho / \rho_{\max}$,把(5)式~(7)式代入(3)式可得

$$W(m, \theta) = a_1 m^4 + a_2 m^3 \cos \theta + a_3 m^2 \cos^2 \theta + a_4 m^2 + a_5 m \cos \theta, \quad (8)$$

其中 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 分别为初级像差、球差、彗差、像散、场曲、畸变系数。

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{1}{8} \frac{n^2 - 1}{n^3} N_A^4 \cdot d, \\ a_2 &= -\frac{1}{2} \frac{n^2 - 1}{n^3} N_A^3 \cdot d \cdot \beta, \\ a_3 &= -\frac{1}{2} \frac{n^2 - 1}{n^3} N_A^2 \cdot d \cdot \beta^2, \\ a_4 &= -\frac{1}{4} \frac{n^2 - 1}{n^3} N_A^2 \cdot d \cdot \beta^2, \\ a_5 &= -\frac{1}{2} \frac{n^2 - 1}{n^3} N_A \cdot d \cdot \beta^3. \end{aligned} \quad (9)$$

从(9)式可以看出,当存储材料处于水平状态

时,在存储读写过程中只受由折射率失配引起的球差影响,其余各项均为零;当存储材料处于倾斜状态时,存储读写过程不但受到折射率失配引起球差的影响,还受到其余各项初级像差(彗差、像散、场曲、畸变)的影响。

模拟在存储介质水平状态时,激光存储过程中球差随数值孔径、存储深度、折射率变化等参量变化关系,选择的参量为:飞秒激光波长 800 nm,存储

介质的折射率为 1.48,普通干燥物镜,物镜数值孔径 $N_A=0.65$,存储深度为 $100\ \mu\text{m}$ 。从图 2(a)可以看出,球差系数随着存储深度的增加而线性增大,并且在 N_A 较大的情况下球差系数随存储深度增加而线性增大的斜率较大;从图 2(b)可得,当物镜数值孔径增加时,球差也迅速增大,并且在同一深度物镜数值孔径越大球差系数也越大;从图 2(c)可以获得,球差系数随着折射率变化的增加而增大。

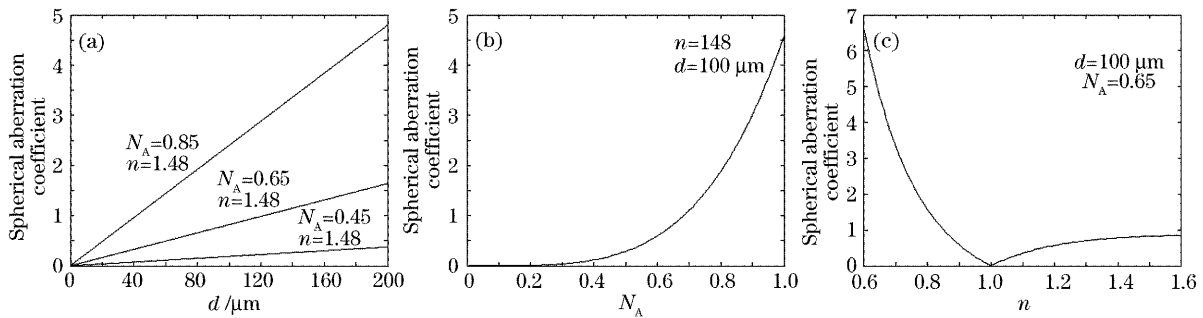


图 2 球差和存储深度(a),数值孔径 N_A (b),折射率(c)的关系图

Fig. 2 Spherical aberration coefficient versus recording depth (a), N_A (b), refractive index (c)

利用波像差公式(2)进行像差求解时,如果使用大数值孔径的物镜,求出的像差与在近轴光线条件下会有一些的不同,不过当存储深度和数值孔径满足一定的条件,由这个造成的误差将可以忽略。在物镜为大数值孔径的条件下,旁轴光线成像会偏离主轴光线一段距离 t 导致引入散焦像差,在介质不处于倾斜状态时,平衡过散焦像差后的球差为

$$W(m, \theta) = a_1 m^4 + a_p m^2, \quad (10)$$

如果偏离距离 t 与存储深度 d 相当,最大的散焦像差系数为

$$a_p = -a_1, \quad (11)$$

把上式代入球差公式可得

$$W(m, \theta) = a_1 (m^4 - m^2), \quad (12)$$

由上式可以看出,平衡过散焦像差后最大球差为

$$W = a_1/4, \quad (13)$$

依照瑞利分辨准则,平衡后的像差需要小于 $0.25\lambda_0$, 即 $a_1 < \lambda_0$ 。

假如 $\lambda_0 = 0.8\ \mu\text{m}$, $n = 1.48$,对于一定的存储深度,可以得出在衍射效应的限制下所能采用的最大数值孔径 $N_{A\text{max}}$:

$$N_{A\text{max}} = 2.04/d^{1/4}, \quad (14)$$

当 $d=100\ \mu\text{m}$ 时, $N_{A\text{max}} \approx 0.65$,在这个数值孔径以下,与近轴光线条件下基本上没有差距。如果存储深度很大,而数值孔径又超过最大数值孔径时,将会导致波像差不满足瑞利分辨判据,从而导致存储点

尺寸过大,能量分散,随着存储深度加深存储效果变差,存储点变得模糊,存储密度变小。

上面的分析仅为由于折射率失配所产生的各项初级像差对双光子三维存储所产生的影响。在实际的应用中,还有很多因素如介质的反射、散射、吸收等都会对三维光信号强度产生影响。

在双光子进行三维光信息存储的过程中,由于光束不断深入介质而引起像差变化,上文对折射率失配引起的像差和对存储效果的影响进行了模拟分析计算。为了得到好的存储效果和更高的存储密度,需要对折射率失配引起的像差进行补偿,下面简单介绍一种开普勒望远镜补偿原理解决像差的方法^[8]。开普勒望远镜由两个消色差双合透镜和一个特征物镜组成,结构图如图 3 所示,通过改变两个消色差双合透镜之间的距离 L 来对特定位置的像差进行补偿。

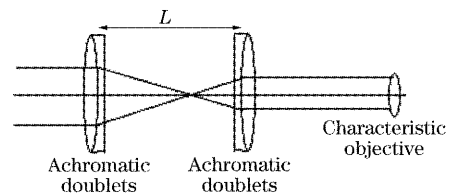


图 3 开普勒系统。通过改变 L 补偿像差

Fig. 3 Keplerian system. Compensation is achieved by changing L

3 实验结果

针对上述计算模拟与分析,我们在一种光致色变材料中进行了实验研究,将全氟环戊烯溶在聚甲基丙烯酸甲酯(Poly-methyl methacrylate, PMMA)溶液中,制备成厚度为 $120\ \mu\text{m}$ 左右的透明薄膜作为存储介质,写入时采用自行组建的中心波长 $800\ \text{nm}$,重复频率 $80\ \text{MHz}$,脉宽 $80\ \text{fs}$ 的钛宝石(Ti:Sapphire)飞秒激光器,物镜 $N_A=0.65$,存储介质折射率 1.48 ,自行组建的共焦荧光显微镜读出^[9]。实验过程中三维平移台处于水平状态,没有发生倾斜,由前面分析可以得出,当存储介质存储过程中没有发生倾斜时像差中除了球差其余各项初级

像差均为零。图 4(a)是存储在不同深度信息层的读出图像,平均写入激光功率为 $18\ \text{mW}$,曝光时间为 $20\ \text{ms}$,读出功率为 $1\ \text{mW}$ 。信息是在样品表面下 $10\ \mu\text{m}$ 处的焦平面上开始存储的,存储点间距离为 $5\ \mu\text{m}$,相邻信息存储层间距为 $20\ \mu\text{m}$ 。图 4(b)是读出信号强度与存储深度的关系图。从图中可以看出:存储信息层数越多,存储信息离介质表面的距离就越大,读出信号强度就越弱,相当于球差随着存储深度的增加而增大;读出信号强度随着存储深度的增加呈现出线性下降,这种现象与理论模拟结果相符合,说明理论模拟结果与实验现象完全吻合。

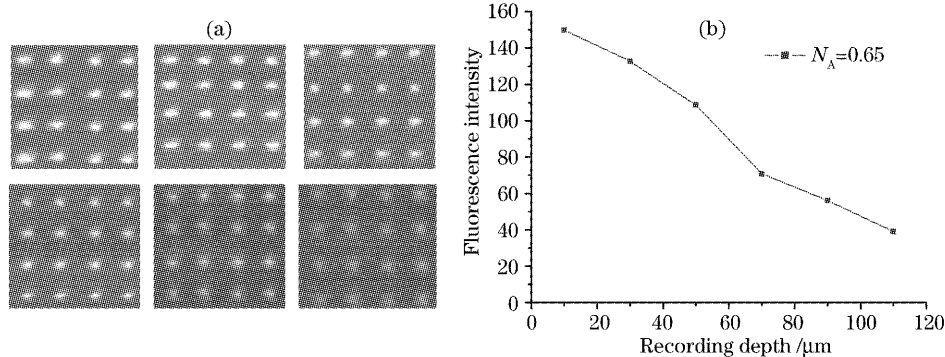


图 4 (a) 六层存储点的读出图像, (b) 读出信号强度与存储深度的关系图

Fig. 4 (a) Images of recorded bits in six consecutive layers, (b) readout signal intensity versus recording depth

4 结 论

理论和实验表明:由于折射率失配,像差会随着存储深度增加而增大,从而导致信号强度随着存储深度的增加而减小;当物镜数值孔径增加时,像差随着存储深度增加而增大的斜率就越大,信号强度随之减小的速度也越快;像差随着折射率变化的增加而增大,信号强度随之减少的速度也将越快。因此在以后的研究中,要合适的光学参量来减少折射率失配所引起的各项初级像差,从而满足三维光信息存储的要求。

致谢 感谢中国科学院化学所分子反应动力学国家重点实验室夏安东教授给我们工作上的支持。

参 考 文 献

- 1 D. A. Parthenopoulos, P. M. Rentzepis. Three-dimensional optical storage memory[J]. *Science*, 1989, **245**(4920): 843~845
- 2 Satoshi Kawata, Yoshimasa Kawata. Three-dimensional optical data storage using photochemical materials[J]. *Chem. Rev.*, 2000, **100**(5): 1777~1788
- 3 Yi Zhang, Alexandr Dvornikov, Yoshi Taketomi *et al.*. Towards

ultra high density multi-layer disk recording by two-photon absorption[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5362**: 1~9

- 4 Edwin P. Walker, Jacques Duparre, Haichuan Zhang *et al.*. Spherical aberration correction for two-photon recorded monolithic multilayer optical data storage [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4342**: 601~604
- 5 Tang Huohong, Zhou Yongjun, Jiang Zhongwei *et al.*. Experimental study on photochromic three-dimensional optical storage under two-photon excitation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(1): 92~96 (in Chinese)
唐火红,周拥军,蒋中伟等. 双光子吸收光致变色三维光存储实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 92~96
- 6 Huohong Tang, Hongfang Jiu, Bing Jiang *et al.*. Three-dimensional optical storage recording by microexplosion in a doped PMMA polymer[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5643**: 258~263
- 7 W. T. Welford. *Aberration of the Symmetrical Optical System* [M]. Chen Huangming, Liang Lixuan transl., Beijing: Science Press, 1982. 128~138, 227~229 (in Chinese)
W. T. 威尔福特. 对称光学系统的像差[M]. 陈晃明, 梁丽轩译. 北京: 科学出版社, 1998. 128~138, 227~229
- 8 Tom D. Milster, Robert S. Upton, Hui Luo. Objective lens design for multiple-layer optical data storage[J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(2): 295~301
- 9 Jiang Zhongwei, Yuan Dajun, Zhu Anding *et al.*. 2-photon 3-D microfabrication technology and its experimental system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(3): 234~238 (in Chinese)
蒋中伟,袁大军,祝安定等. 双光子三维微细加工技术及实验系统的开发[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(3): 234~238