

文章编号:1004-4213(2010)07-1243-5

三维光存储中折射率失配引起的球差补偿*

蔡建文^{1,2}, 黄文浩²

(1 常州工学院 光电工程学院, 江苏 常州 213002)

(2 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 合肥 230026)

摘要:为实现三维光存储中折射率失配引起的球差补偿,建立了光学存储系统模型,获得了折射率失配引起的波前偏差函数与存储深度的表达式.采用泽尔尼克循环多项式对波前偏差函数进行补偿展开.在双光子荧光和单光子共焦荧光读出方式下,均可获得读出荧光强度与存储深度的关系:在折射率失配引起的球差未得到补偿矫正的情况下,存储深度在 200 μm 左右读出荧光强度基本上下降为零;当折射率失配引起的初级球差被补偿矫正后,读出荧光强度随存储深度的下降得到较好改善;当折射率失配引起的二级球差被补偿矫正后,存储深度在 1 mm 内存储点强度随深度基本上没有明显地变化.并且对像差补偿方法进行了具体地分析.

关键词:信息光学;三维光存储;球差补偿;折射率失配

中图分类号: TQ591

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103907.1243

0 引言

21 世纪信息化的飞速发展使信息技术需要处理和存储的数据正以指数形式增长.而传统的二维光存储受到衍射效应的限制,光存储点的尺寸大约只能降低到光波波长的一半,目前传统的二维光存储几乎达到了这一极限,存储密度难以进一步提高.随着 1989 年美国科学家 Rentzepis 提出一种新的三维光存储方法,存储容量可以提高几个数量级,这个领域成为人们关注的热点^[1-3].

但是三维光存储与二维光存储有很大的不同,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,随着存储深度的增加,存储点强度不断降低,存储点的尺寸不断变大.本课题组在双光子三维光存储领域进行了深入的机理研究,并对光致变色、光致漂白等材料进行了双光子存储实验^[4-6],从实验结果可以清晰地看到折射率失配对存储所产生地严重影响;并对折射率失配引起的像差对三维光存储的影响进行了理论和实验上的研究^[7].

为实现三维光存储中折射率失配引起的球差补偿,本论文建立光学存储系统模型,得出折射率失配引起的波前偏差函数和瞳函数与存储深度的表达式.由于采用的光学补偿矫正技术^[8-9]可以用不同组合的泽尔尼克像差多项式表示,因此可采用泽尔尼

克循环像差多项式对波前偏差函数进行补偿展开.在双光子荧光和单光子共焦荧光读出方式下,可分别获得荧光点强度与存储深度的关系,从模拟结果可以得出:在两种方式下,在折射率失配引起的球差未得到补偿矫正的情况下,存储点强度衰减地很快,存储深度在 200 μm 左右存储点强度基本上为零;当折射率失配引起的初级球差被补偿矫正后,存储点强度随存储深度地下降得到了很大地改善;当折射率失配引起的二级球差也被补偿矫正后,存储深度在 1 mm 内存储点强度随深度基本上没有明显地变化.

1 折射率失配引起的波前偏差函数和点扩散函数分析

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,即空气和存储材料,空气和存储材料的折射率分别为 n_1 和 n_2 ,由于两种介质折射率的不同,使光束通过物镜后会产生一波前偏差函数 $\varphi(d, \rho)$,其中 d 表示存储深度, ρ 表示半径归一化坐标, $\rho = \sin \phi_1 / \sin \alpha = \sin \phi_2 / \sin \beta$,其中 ϕ_1, ϕ_2 分别为存储过程中两种介质分界处的入射角和出射角, α, β 分别为最大入射角和最大出射角,物镜的数值孔径为 NA, $\text{NA} = n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$.在三维光存储过程中,光束从空气中进入存储介质内后需走过一段路径(如图 1), $\varphi(d, \rho)$ 等于在两种介质中光束经过的光程长度 $n_2 L_2$ 和 $n_1 L_1$ 之差,即

$$\varphi(d, \rho) = n_2 L_2 - n_1 L_1 \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(50335050)资助

Tel: 0519-85217613

Email: caijw@ustc.edu.cn

收稿日期: 2009-10-12

修回日期: 2010-01-13

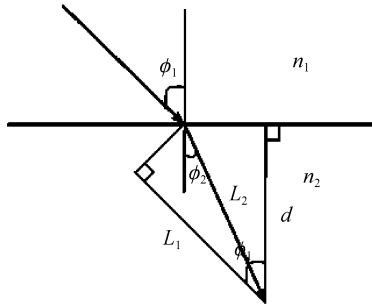


图1 光通过两层介质的聚焦路径

Fig. 1 Path of light being focused through two media

由图1几何关系,可以得出

$$L_2 = d / \cos \phi_2, L_1 = L_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (2)$$

根据斯涅耳折射定律,得出

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (3)$$

把式(2)和式(3)代入式(1),得

$$\begin{aligned} \varphi(d, \rho) &= n_2 d / \cos \phi_2 - n_1 d \cos(\phi_1 - \phi_2) / \cos \phi_2 = \\ &= n_2 d / \cos \phi_2 - n_1 d (\cos \phi_1 \cos \phi_2 + \sin \phi_1 \sin \phi_2) / \\ &= \cos \phi_2 = n_2 d / \cos \phi_2 - n_1 d \cos \phi_1 - n_1 d \sin \phi_1 \cdot \\ &= \sin \phi_2 / \cos \phi_2 = n_2 d / \cos \phi_2 - n_2 d \sin^2 \phi_2 / \\ &= \cos \phi_2 - n_1 d \cos \phi_1 = n_2 d (1 - \sin^2 \phi_2) / \cos \phi_2 - \\ &= n_1 d \cos \phi_1 = d (n_2 \cos \phi_2 - n_1 \cos \phi_1) \end{aligned} \quad (4)$$

把 $\rho = \sin \phi_1 / \sin \alpha = \sin \phi_2 / \sin \beta$ 代入式(4),可以获得

$$\varphi(d, \rho) = n_1 d \sin \alpha \left(\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \beta} - \rho^2} - \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \alpha} - \rho^2} \right) \quad (5)$$

在双光子三维光存储光程中,由于折射率失配产生的球差使得光场的相位改变而导致变形,球差的影响即波前偏差函数可以写入离焦球函数中,离焦瞳函数为

$$P(\rho, u) = P(\rho) \exp(iu\rho^2/2 + ik\varphi(\rho, d)) \quad (6)$$

$P(\rho)$ 为半径归一化的瞳函数,定义为

$$P(\rho) = 1 \quad \rho \leq 1; \quad P(\rho) = 0$$

其他情况,设 $P(\rho, d) = \exp[ik\varphi(\rho, d)]$, 此时离焦点扩散函数为

$$h(v, u, d) = \int_0^1 P(\rho, d) \exp(iu\rho^2/2) J_0(\rho v) \rho d\rho \quad (7)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, λ 表示波长; v, u 分别表示归一化横向坐标和纵向坐标

$$v = \frac{2\pi n_1 r}{\lambda} \sin \alpha \quad (8)$$

$$u = \frac{8\pi n_1 z}{\lambda} \sin^2(\alpha/2) \quad (9)$$

式中 r, z 分别表示距离焦点的在横向和纵向的位移。

因此可以得到焦点区域存储点的光强分布为

$$I(v, u, d) = |h(v, u, d)|^2 \quad (10)$$

2 折射率失配引起的球差补偿矫正

在三维光存储中折射率失配引起的球差可以采用多种光学方法进行补偿^[8-9], 各种不同的光学补偿

方法都相当于在原有光路中加上一相反地球差, 它可以展开为零阶泽尔尼克像差循环多项式^[10]

$$\varphi(\rho, d) = dn_1 \sin \alpha \left(\sum_{n=0}^{\infty} A_{n,0} Z_{n,0}(\rho) \right) \quad (11)$$

式中零阶泽尔尼克多项式和其系数的表达式分别为

$$Z_{n,0}(\rho) = \sqrt{n+1} \sum_{s=0}^{n/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! (n/2-s)!} \rho^{n-2s} \quad (12)$$

(n 为偶数)

$$A_{n,0} = B_n(\alpha) - B_n(\beta) \quad (13)$$

式中 $B_n(\gamma)$ 为

$$B_n(\gamma) = \left[1 - \frac{n-1}{n+3} \tan^4\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right] \frac{\tan^{n-1}\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{2(n-1)\sqrt{n+1}} \quad (14)$$

在零阶泽尔尼克多项式中, 当 $n=0, 2, 4, 6$ 时, $Z_{n,0}(\rho)$ 如表1。

表1 零阶泽尔尼克多项式

Table 1 Zero-order Zernike polynomials

n	$Z_{n,0}(\rho)$
0	1
2	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$
4	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$
6	$\sqrt{7}(20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1)$

如表1, $n=0$ 时, 表示一个常量, 对点扩散函数不产生影响, 即存储点强度不会随它产生变化; $n=2$ 时, 表示离焦, 会使存储点强度在轴向有一个偏移, 对存储点强度大小没有影响; $n=4$ 时, 表示存储点强度会受到折射率失配引起的初级球差的影响; $n=6$ 时, 表示存储点强度会受到折射率失配引起的二级球差的影响。为了矫正光学存储系统由于折射率失配引起的球差, 即需要矫正波前偏差函数, 使得瞳函数尽可能达到1, 因此需对光学存储系统加上一个光学补偿系统, 相当于在波前偏差函数基础上加上一个反向的泽尔尼克像差多项式组合, 如式(15)

$$\varphi'(\rho, d) = \varphi(\rho, d) - dn_1 \sin \alpha \left(\sum_{n=0}^{2N+2} A_{n,0} Z_{n,0}(\rho) \right) \quad (15)$$

式中 N 代表球差补偿级数, 此时对应的瞳函数变为

$$P(\rho, d) = \exp(ik\varphi'(\rho, d)) \quad (16)$$

对应用泽尔尼克多项式进行补偿后的点扩散函数为

$$h(v, u, d) = \int_0^1 \exp(ik\varphi'(\rho, d)) \cdot \exp\left(\frac{iu\rho^2}{2}\right) J_0(\rho v) \rho d\rho \quad (17)$$

当矫正级数 $N=0$ 时, 代表在存储系统中没有对折射率失配引起的球差进行矫正, 只是对离焦现象进行了矫正; 只有当 $N \geq 1$ 时, 才对折射率失配引起的球差进行了补偿矫正, 当 $N=1$, 矫正了系统中存在的初级球差; 当 $N=2$ 时, 又矫正了系统中的二级球差; 当 $N \geq 3$ 时, 除了需要矫正初级和二级球差外, 还需要矫正更高级的球差。

在双光子三维光存储中,对不同的存储介质进行双光子写入,可采用双光子荧光和单光子共焦荧光等不同的读出方式,这两种读出方式下所获得的荧光强度分别为^[11]

$$I_{2p\text{-conv}}(v, u, d) = I^2\left(\frac{v}{2\beta}, \frac{u}{2\beta}, \frac{d}{2\beta}\right) = \left| h\left(\frac{v}{2\beta}, \frac{u}{2\beta}, \frac{d}{2\beta}\right) \right|^4 \quad (18)$$

$$I_{1p\text{-conf}}(v, u, d) = I\left(\frac{v}{\beta}, \frac{u}{\beta}, \frac{d}{\beta}\right) I(v, u, d) = \left| h\left(\frac{v}{\beta}, \frac{u}{\beta}, \frac{d}{\beta}\right) \right|^2 |h(v, u, d)|^2 \quad (19)$$

式(18)、(19)中 β 意义为:假设荧光波长为 λ 时,用单光子共焦荧光读出方式,单光子激发波长为 $\beta\lambda$;用双光子荧光读出方式,双光子激发波长为 $2\beta\lambda$, β 应小于1.

模拟双光子三维光存储,对存储材料进行双光子写入.双光子荧光和单光子共焦荧光读出方式时,在折射率失配引起的球差未得到补偿以及初级球差、二级球差分别得到补偿矫正的情况下荧光点强度与存储深度的关系.系统参量为: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 $NA=0.65$,从图2(a)可以看出:在折射率失配引起的球差未得到补偿矫正的情况下,存储点强度衰减地很快,存储深度在100 μm 左右存

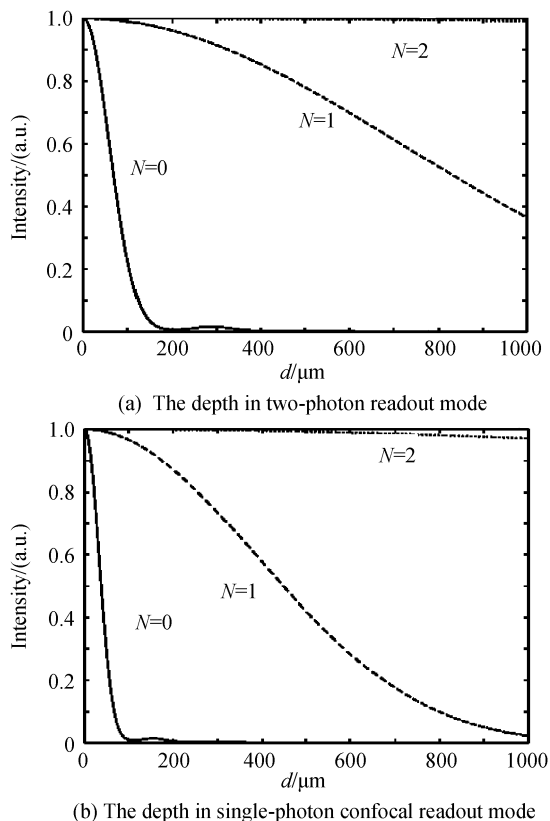


图2 存储点荧光强度与存储深度的关系
Fig. 2 The relationship between the fluorescence intensity of the storage point and the depth

储点强度基本上为零;当折射率失配引起的初级球差得到补偿后,存储点荧光强度随存储深度地变化得到了很大地改善,存储深度300 μm 处,可以恢复到表面信号强度的78%;当折射率失配引起的二级球差也得到补偿后,存储深度在1 mm内存储点强度随深度基本上没有明显地变化.从图2(b)可以看出:在折射率失配引起的球差未得到补偿矫正的情况下,存储点强度衰减地很快,存储深度在200 μm 左右存储点强度基本上为零;当折射率失配引起的初级球差得到补偿后,存储点荧光强度随存储深度的变化得到了改善,存储深度500 μm 处,可以恢复到表面信号强度的42%;当折射率失配引起的二级球差也得到补偿后,存储点荧光强度随深度地变化不明显,存储深度在1 mm内存储点强度随深度基本上没有明显地变化.从图2可以看出,存储深度500 μm 内,当初级球差得到补偿的情况下,可以满足三维存储的要求.

3 球差补偿实现方法

在三维光存储读写过程中,由于光路需要经过两层不同的介质(存储介质和空气),从而产生球差,改变焦平面上光强分布,降低光强大小,给存储带来很大的影响.因此需要采取一些像差预补偿方法来减少球差,增强信息点的光强大小,减小信息点的尺寸大小.补偿方法有改变物镜的工作长度(即物平面到像平面之间的距离)^[12]、开普勒望远镜系统^[13]等.

1) 改变物镜工作长度

在物镜前加上一个长焦距的透镜,可以通过改变长焦距透镜的位置来改变物镜的工作长度,从而实现降低球差的目的,可以有效地改善存储的效果,使信息点强度随着存储深度没有明显地降低.文献[12]中采用了这种方法进行球差补偿,对光致漂白材料进行存储实验,在补偿后存储效果得到很好的改善,实验结果与上述理论模拟相吻合.

2) 开普勒望远镜系统

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,结构如图3,通过改变两个消色差双合

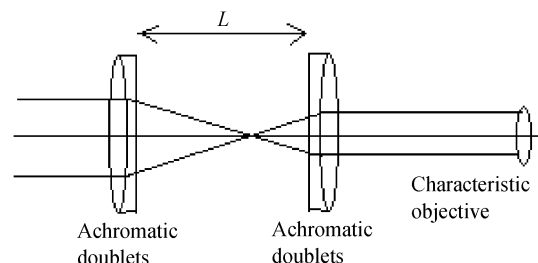


图3 开普勒系统中通过改变L补偿像差
Fig. 3 Compensation is achieved by changing L in Keplerian system

透镜之间的距离 L 来对特定位置的像差进行补偿. 文献[13]中采用这一补偿方案对像差进行补偿, 光强大小获得很大的提高, 与上述理论模拟相符合.

4 结论

在双光子三维光信息写入和读出过程中, 由于光束需要经过两层不同折射率的介质, 由于折射率失配会产生球差. 本文从理论上模拟分析在球差未补偿和补偿的情况下存储点信号强度与存储深度之间的关系. 首先建立光学存储系统模型, 获得折射率失配引起的波前偏差函数和瞳函数与存储深度的表达式; 由于采用的光学补偿技术可用不同组合的泽尔尼克像差多项式表示, 因此可采用泽尔尼克循环多项式对波前偏差函数进行补偿展开; 在双光子荧光和单光子共焦荧光读出方式下, 可获得荧光强度与存储深度的关系, 从模拟结果可以得出: 在两种读出方式下, 在折射率失配引起的球差未得到补偿的情况下, 存储点强度衰减地很快; 当折射率失配引起的初级球差得到补偿后, 存储点强度随存储深度地下降得到很大地改善; 当折射率失配引起的二级球差也得到补偿后, 存储深度在 1 mm 内存储点强度随深度基本上没有明显地变化. 并且对像差补偿方法进行了具体了讨论, 在以后的研究中, 可以采用合适的光学补偿技术来减少折射率失配所引起的各项球差, 从而满足三维光信息存储的要求.

参考文献

- [1] KAWATA S, KAWATA Y. Three-dimensional optical data storage using photochromical materials[J]. *Chem Rev*, 2000, **100**(5): 1777-1788.
- [2] MCPHAIL D, GU M. Use of polarization sensitivity for three-dimensional optical data storage in polymer dispersed liquid crystals under two-photon illumination[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, **81**(7): 1160-1162.
- [3] 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]. *J Appl Phys*, 2003, **94**(3): 1304-1307.

- [4] TANG Huo-hong, JIU Hong-fang, JIANG Bing, *et al.* Three-dimensional optical storage recording by microexplosion in a doped PMMA polymer[C]. *SPIE*, 2005, **5643**: 258-263.
- [5] TANG Huo-hong, ZHOU Yong-jun, JIANG Zhong-wei, *et al.* Experimental study on photochromic three-dimensional optical storage under two-photon excitation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(1): 92-96.
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] CAI Jian-wen, SHEN Zhao-long, JIANG Bing, *et al.* Two-photon photobleaching three-dimensional optical storage with DVD pickup head[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1401-1405.
蔡建文, 沈兆龙, 江兵, 等. 基于 DVD 光头的双光子光致漂白三维光存储[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1401-1405.
- [7] CAI Jian-wen, CHENG Ye-zeng, SHEN Zhao-long, *et al.* Influence of refractive index mismatch on the optical aberration in two-photon three-dimensional optical data storage[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 443-446.
蔡建文, 程晔增, 沈兆龙, 等. 折射率失配对双光子三维光存储中像差的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 443-446.
- [8] NEIL M A, JUSKAITIS R, BOOTH M J, *et al.* Adaptive aberration correction in a two-photon microscope[J]. *Journal of Microscopy*, 2000, **200**(2): 105-108.
- [9] SOMAKANTHAN S, KARSTEN D, MATHIAS H, *et al.* Effective spherical aberration compensation by use of a nematic liquid-crystal device[J]. *Appl Opt*, 2004, **43**(13): 2722-2729.
- [10] ROBERT J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *JOSA*, 1976, **66**(3): 207-211.
- [11] BOOTH M J, WILSON T. Refractive-index-mismatch induced aberrations in single-photon and two-photon microscopy and the use of aberration correction[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2001, **6**(3): 266-272.
- [12] MCPHAIL D, GU M. Effects of refractive-index mismatch on three-dimensional optical data-storage density in a two-photon bleaching polymer[J]. *Appl Opt*, 1998, **37**(26): 6299-6304.
- [13] EDWIN P W, JACQUES D, ZHANG H, *et al.* Spherical aberration correction for two-photon recorded monolithic multilayer optical data storage[C]. *SPIE*, 2002, **4342**: 601-604.

Compensation of Spherical Aberration Induced by Refractive Index Mismatch in Three-dimensional Optical Storage

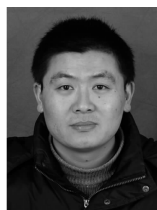
CAI Jian-wen¹, HUANG Wen-hao²

(1 *School of Photoelectric Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213002, China*)

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

Abstract: For the compensation of the spherical aberration induced by refractive index mismatch in three-dimensional optical storage, the model of the optical storage is established, and the expression of the wavefront phase aberration function is achieved induced by refractive index with the storage depth. The phase aberration function is spread with Zernike polynomials. Under reading method of two-photon fluorescence and one-photon confocal fluorescence, the relation of the intensity with storage depth is obtained; under uncompensating the spherical aberration induced by refractive index mismatch, storage fluorescence intensity falls to zero in the storage depth of 200 μm ; under compensating the first-order spherical aberration, the downtrend of storage fluorescence intensity with the storage depth is improved; under compensation the second-order spherical aberration, the storage fluorescence intensity varies little in the storage depth of 1 mm. And the method of the aberration compensation is analyzed in detail.

Key words: Information optics; Three-dimensional optical data storage; Compensation of spherical aberration; Refractive index mismatch



CAI Jian-wen was born in 1978 and received his Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2007. Now he is a lecturer, and his research interests focus on nonlinear optics and three dimension optical data storage.

HUANG Wen-hao was born in 1944. He is a professor at University of Science and Technology of China. His research interests focus on nanotechnology, laser material processing and three dimension optical data storage.