

文章编号 1004-924X(2004)04-0432-06

折射率失配对双光子三维信息存储中信息点的影响

周拥军¹, 唐火红¹, 黄文浩¹, 夏安东^{1,2}

(1. 中国科技大学 精密机械及精密仪器系, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院 化学所分子反应动力学实验室, 北京 100080)

摘要: 根据 Torok 的光在多层介质中传播的理论, 模拟了在折射率失配情况下点扩展函数的强度分布。在介质折射率为 1.48, 多种物镜数值孔径 $NA = 0.25, 0.45, 0.65, 0.85$ 条件下, 分析了信息点轴向尺寸及读出信号强度变化趋势。选取合适的光学参数(如物镜的数值孔径 $NA = 0.45$, 存储介质的折射率 1.48), 能够使信息点在深度 $200 \mu\text{m}$ 内轴向尺寸变化率小于 4%, 信号读出强度变化率小于 30%, 提高了存储效果。对选取各种物镜和介质折射率的情况下信息点的变化趋势分析表明, 折射率失配使信息点横向尺寸随深度变化不大, 而轴向尺寸及信号读出强度产生较大的变化, 变化的程度与物镜 NA 、介质的折射率及存储深度密切相关。采用与模拟时相同的光学参数, 在光致变色材料中进行了双光子三维存储实验。通过观察信息点的轴向及横向扫描图像和信号的读出强度, 证实了这种变化趋势。实验结果为双光子三维存储提供了参考依据。

关键词: 折射率失配; 双光子; 三维光学信息存储

中图分类号: TN405 文献标识码: A

Influence of refractive index mismatch on data bit in two-photon three-dimensional data storage

ZHOU Yong-jun¹, TANG Huo-hong¹, HUANG Wen-hao¹, XIA An-dong^{1,2}

(1. *Department of Precision Machinery and Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;* 2. *Molecular Reaction Dynamics Lab, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China*)

Abstract: Based on Torok's theory, the profile of IPSF was simulated under the condition of refractive index mismatch. Under the condition of refractive index 1.48 and several kinds of objective lens such as $NA = 0.25, 0.45, 0.65, 0.85$, the variation trends of the axial bit size and readout signal intensity were analyzed. Selecting appropriate optical parameter (such as $NA = 0.45$, refractive index 1.48), at the depth of less than $200 \mu\text{m}$, the variation of the axial bit size is less than 10%, the max variation of readout signal intensity is less than 30%, so the effect of recording is improved. By analyzing the variation trends of data bit under the condition of several kinds of NA and refractive index, it indicates that refractive index mismatch makes lateral bit size little change but axial bit size and readout signal intensity greater change. The change degree is closely related with NA , refractive index and recording depth. Adopting the same optical parameter

收稿日期: 2004-03-26; 修订日期: 2004-06-22.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50275140)、“863”项目(MEMS 2003AA404050)资助

ter with simulating, three dimensional data was recorded in photochromic material by two photon excitation. By observing the scanning image of data bit in axial and lateral direction and readout signal intensity, this variation trend was testified.

Key words: refractive index mismatch; two photon; three dimensional optical data storage

1 引言

随着信息技术的发展,人们对数据存储的容量和密度的要求越来越高。三维信息存储是指将信息点(或称 bit)写入存储介质的三维体积中,而传统的二维信息存储(如 CD)是将信息点仅仅存储在介质的表面。因此多层(三维)光学信息存储有效的提高了信息存储容量,受到人们的广泛关注^[1-3]。多层信息存储要求在数据的写入和读出时具有三维分辨能力。双光子吸收是一种非线性光学现象,其吸收率与光强的平方成正比,因此只有在 λ^3 (λ 为写入激光的波长) 范围内的存储介质受到激发。这样可以将数据写入介质中某一层而对邻层不发生干扰,因此双光子写入技术具有三维的分辨能力。共焦显微镜作为一种具有三维分辨能力的读出手段被广泛采用^[4,5]。

三维数据写入过程与二维存储明显的不同是激光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(即折射率失

配),激光在存储介质中的会聚点的强度分布与单一介质时相比会有明显的不同。这里将激光经过物镜后的会聚点强度分布定义为点扩展函数的强度(Intensity of Point Spread Function, IPSF),也就是将激光看作是无限远的点光源,其会聚点为其通过物镜所成的像。信息点的大小与 IPSF 的分布相关,而信息点读出信号的强弱与 IPSF 的最大光强相关。此前就曾就折射率失配对共焦及双光子显微镜的成像影响进行了研究^[6-7],本文将讨论折射率失配对三维光学数据写入的影响。

2 理论基础

从衍射的角度出发,折射率失配问题可以看成是电磁场在分层介质中的传播问题。如图 1 所示,Torok 等从 Wolf 的积分公式导出了两层介质间界面上的电磁场分布,然后应用菲涅尔公式在单独的平面波上导出这个电磁场在第二分层介质内的分布^[8]。忽略物镜的去极化作用和向量作用,最终可得到在焦点处的光强分布为^[7]:

$$I(r, z) = \left| \int_0^\pi (\cos \varphi_1)^{1/2} (\sin \varphi_1) \exp[ik_0 \Psi(\varphi_1, \varphi_2, -d)] \times (\tau_s + \tau_p \cos \varphi_2) J_0(k_0 r_p n_1 \sin \varphi_1) \exp(ikz_p n_2 \cos \varphi_2) d\varphi_1 \right|^2, \quad (1)$$

其中 n_1 和 n_2 分别为第一层和第二层介质的折射率, d 为两介质界面到焦点的距离, J_0 为零阶贝塞尔函数, k_0 为入射光在真空中的波数, r_p, z_p 分别为横向和轴向坐标, τ_s 和 τ_p 分别为菲涅耳系数^[8],

$\alpha = \arcsin(NA)$, 即由物镜 NA 决定的最大收敛角, φ_1 和 φ_2 分别为光在两层介质中的会聚角,

$$\varphi_1 = \arcsin(NA/n_1), \quad (2)$$

$$\varphi_2 = \arcsin[n_1 \sin(\varphi_1)/n_2], \quad (3)$$

Ψ 由下式给定:

$$\Psi = -k_0 d (n_1 \cos \varphi_1 - n_2 \cos \varphi_2), \quad (4)$$

所采用的坐标系统如图 1 所示,坐标原点位于无折射率失配时光束的会聚点(图中虚线交点)。

3 存储介质中点扩展函数的模拟

模拟 IPSF 在介质中的分布时选取的参数为:飞秒激光波长 800 nm, 存储介质的折射率为

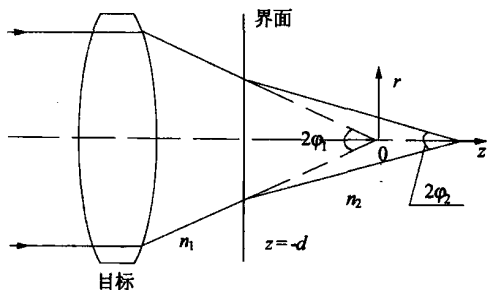


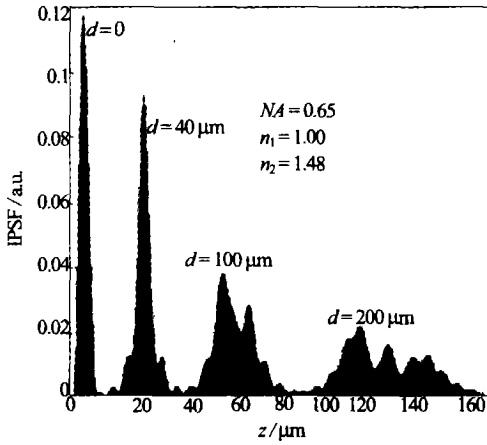
图 1 光通过两层介质的聚焦路径

Fig. 1 Diagram of light Path focused through two media

$n_2 = 1.48$, 普通干燥物镜。以下模拟结果根据公式(1)~(4), 用 Matlab 带入不同的参数得到。图 2 所示为不同深度的 IPSF 模拟结果, 其中物镜的数值孔径 $NA = 0.65$ 。从图中可以看出, 随着存储深度的逐渐加深, 焦点处的光强逐渐减小。光强在横向(垂直于光轴方向)的分布形状变化不大(图 2b)。将其强度归一化后测量横向半高宽 FWHM(Full Width Half Maximum)发现, 在深度 $200 \mu\text{m}$ 以内变化率不超过 10%。但在光轴方向, 光强的分布轮廓发生较大变形(图 2a)。尤其当深度大于 $100 \mu\text{m}$ 后, 出现一个次高峰。随着

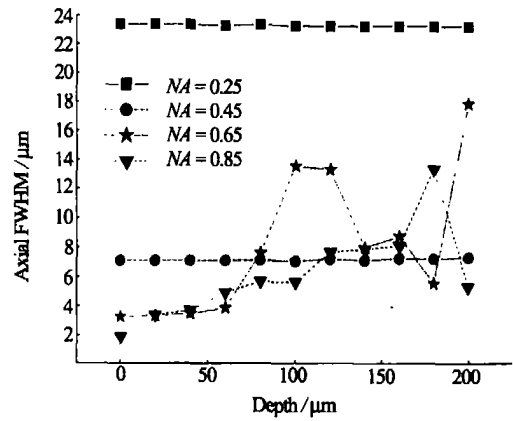
深度的加大, 主高峰逐渐减小, 而次高峰逐渐增大并增多, 因此光轴方向的半高宽随深度的增加迅速增加。轴向半高宽的增加意味着信息点的轴向尺寸增加。

在其他参数不变的情况下, 对不同数值孔径物镜的 IPSF 进行了模拟。由于双光子吸收与激发光强度的平方成正比, 因此模拟和计算了 IPSF 最大值的平方 I_{max}^2 及 IPSF 平方的轴向半高宽 FWHM 如图 3 所示。存储介质的折射率选为 $n_2 = 1.48$ 。在双光子三维存储时, 不同层面的 I_{max}^2 的大小决定了信息点读出强度的大小, 而在层间距较小的情况下, 轴向半高宽变化会使层间的数



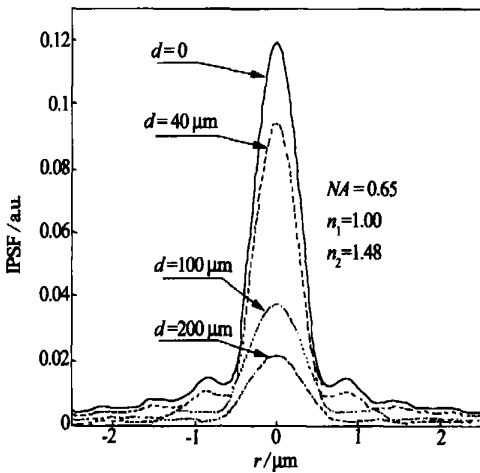
(a) 轴向

(a) Axial cross sections



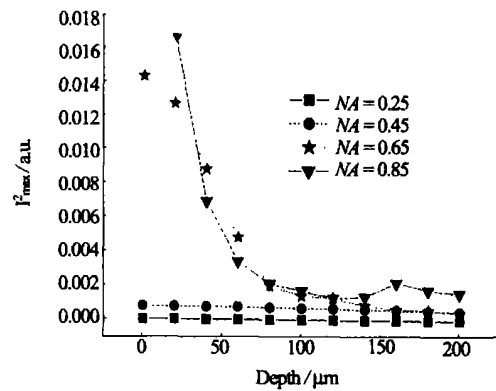
(a) $IPSF^2$ 的轴向半高宽随深度的变化趋势

(a) Axial FWHM axial FWHM of $IPSF^2$ vs storage depth



(b) 横向

(b) Transverse cross sections



(b) 最大光强的平方 I_{max}^2 随深度的变化趋势

(b) I_{max}^2 vs storage depth

图 2 在存储介质不同深度 IPSF 的强度分布

Fig. 2 Profile of IPSF at different depths in storage media

图 3 不同数值孔径下双光子写入时信息点的变化趋势(理论模拟)

Fig. 3 Variation trends of the data bits with two-photon writing at different NA (theoretical simulation)

据点发生窜扰^[9]。因此理想的 IPSF 的分布应当是: 光强大而轴向半高宽小, 并且随深度的变化, 二者的变化越小越好。从图 3 可以看出, 当 $NA = 0.25$ 时, 光强的平方及其轴向半高宽随深度的变化极小。模拟的结果显示, 即使深度达 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 时二者的变化率仅 2% 和 1% 。然而其 I_{max}^2 仅为 $NA = 0.45$ 时的 1% 左右, 并且其轴向半高宽过大, 约 $23.5\ \mu\text{m}$, 不利于获得较高的存储密度。而当 $NA = 0.65$ 和 $NA = 0.85$ 时, I_{max}^2 随深度的变化迅速减小, 当深度大于 $100\ \mu\text{m}$ 后, I_{max}^2 接近 $NA = 0.45$ 时的值。并且它们的半高宽随深度的变化起伏不定。这主要是由于在深度增加时次高峰增长和增多造成的。当 $NA = 0.45$ 时, I_{max}^2 的变化率在深度 $200\ \mu\text{m}$ 以内约 30% , 轴向半高宽也较小, 平均约为 $7.2\ \mu\text{m}$ 左右, 在深度 $200\ \mu\text{m}$ 以内的变化率约 4% 。而当 $NA = 0.65$ 时, 在深度 $200\ \mu\text{m}$ 以内 I_{max}^2 的最大变化率约 700% , 轴向半高宽最大变化率约为 400% 。因此, 在介质折射率为 1.48 的情况下, 用 $NA = 0.45$ 的物镜能得到轴向较小的光斑, 其 I_{max}^2 和 I^2 轴向半高宽的变化率也较小, 较其他几种物镜更能获得良好的存储效果。

不同的存储介质的折射率也会对物镜的选择构成影响。图 4 为在同一深度 $100\ \mu\text{m}$ 下不同的介质折射率对 IPSF 的轴向分布的影响。可以看出, n_2 的值越接近 n_1 , 点扩展函数的强度分布变形也越小。当选择物镜为 $NA = 0.85$ 的油镜时 (此时 $n_1 = 1.518$), 得到其光强的分布如图 5 所示。从中可以看出即使在深度达到 $800\ \mu\text{m}$, 点扩展函数的强度分布仍然变化不大。但油镜在实用

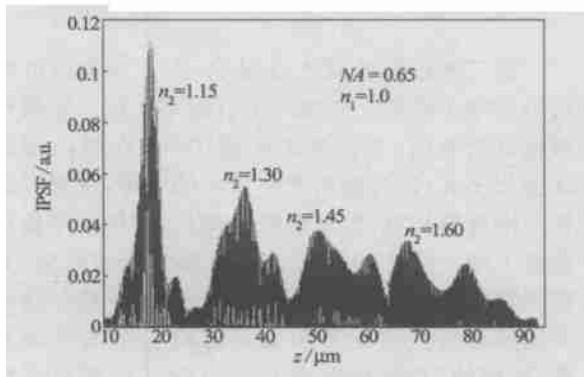


图 4 在相同深度 $100\ \mu\text{m}$ 时不同折射率的介质中 IPSF 的轴向分布

Fig. 4 Axial cross section of IPSF at the same depth $100\ \mu\text{m}$ in different refractive index media

的存储系统中使用有较大技术难度。

前面的分析仅为折射率失配对介质内点扩展函数的强度分布的影响。在实际应用中, 还有很多因素如介质的反射、散射、吸收等都会对点扩展函数的强度分布产生影响。

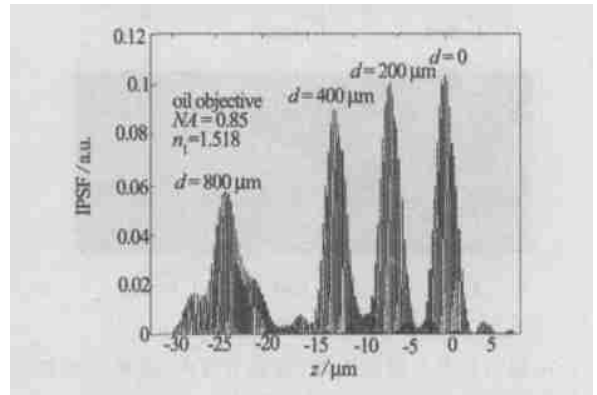


图 5 在不同深度 IPSF 的轴向分布

Fig. 5 Axial cross section of IPSF at different depths

4 实验结果

针对上述分析, 在一种光致色变材料中进行了实验研究。样品为 PMMA 和二芳基乙烯类化合物分子 (50: 1) 溶解后制备, 由清华大学化学系

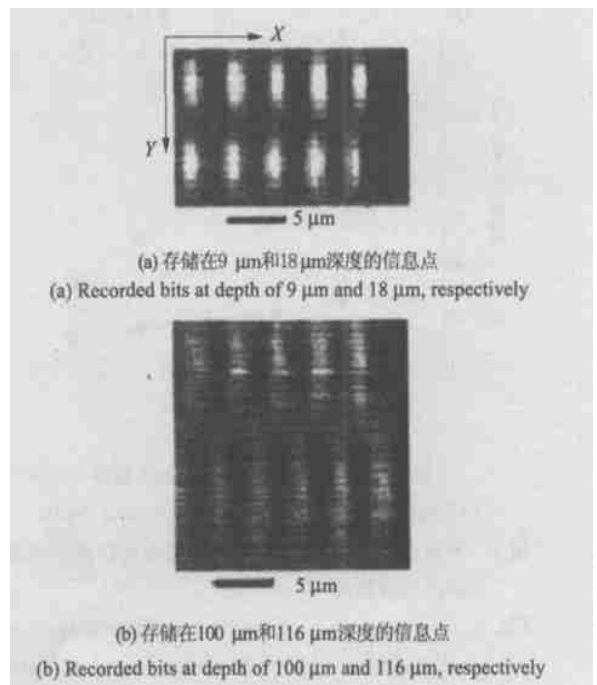
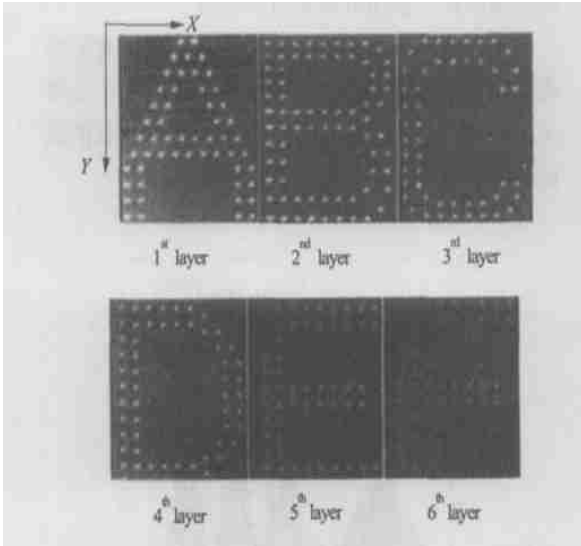


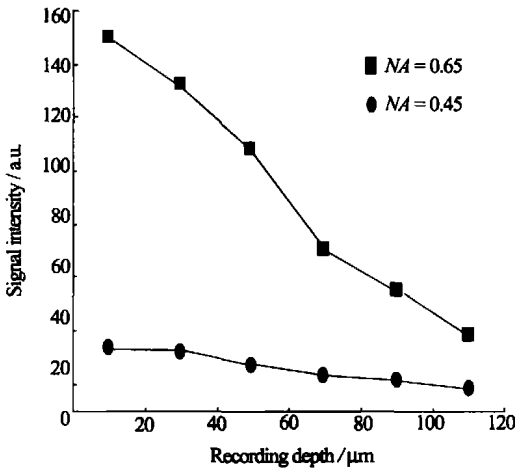
图 6 不同深度的信息点在 $X-Z$ 方向上的扫描图像

Fig. 6 Scanning image of the bits at different depth in $X-Z$ direction



(a) 6 层信息点存储的图像, 双光子写入, 共焦荧光显微镜读出, 信息点间距和层距分别为 $4\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$, $NA = 0.65$

(a) Image of recorded bits in 6 consecutive layers, recorded by two-photon excitation, readout by confocal fluorescence microscope. The two adjacent bits distance in each layer and the two adjacent layers interval are $4\ \mu\text{m}$ and $20\ \mu\text{m}$, respectively. $NA = 0.65$



(b) 信号读出强度随深度的变化趋势

(b) Readout signal intensity vs recording depth

图 7 不同深度的信息点在 X-Y 方向上的扫描图像及读出信号强度

Fig.7 Scanning image of the bits at different depth in X-Y direction and their readout signal intensity

提供。图 6 为不同深度下信息点在 X-Z 方向(Z 为光轴方向)的扫描图像。写入时采用自行组建的 $800\ \text{nm}$ 、 $80\ \text{fs}$ 、 $80\ \text{MHz}$ 的 Ti 宝石飞秒激光器^[10], 平均功率 $12\ \text{mW}$, 物镜 $NA = 0.65$, 存储介质折射率 1.48 , 自行组建的共焦荧光显微镜读出^[11]。从图 6(a) 中可以看出在前两层, 由于存储深度浅(存储深度为 $9\ \mu\text{m}$ 和 $18\ \mu\text{m}$), IPSF 在 Z 向半高宽较小, 导致信息点 Z 向尺寸较小。当深度增加到 $100\ \mu\text{m}$ 以上时, 如图 6(b) 所示, 信息点在 Z 向尺寸约为前两层的 $3\sim 3.5$ 倍, 同时信息点的信号强度(信息点的亮度)相比前两层明显减弱, 其变化趋势与理论分析(图 2(a)、图 3(a)) 基本相符。

图 7 为实验测得的不同深度层双光子写入的信息点的读出信号强度。图 7(a) 为共焦荧光显微镜读出的六层信息点组成的字母 A~F 图像, 信息点间距和层间距分别为 $4\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$, 写入物镜为 $NA = 0.65$, 其他实验条件与上述相同。图像反映出信息点大小在 X-Y (横向) 方向随深度变化不大, 但读出信号强度有明显变化: 图像随着深度的增加, 对比度逐渐减小。如图 7(b) 为写入物镜分别为 $NA = 0.65$ 和 $NA = 0.45$ 时实测读出信号强度的变化趋势, 二者写入和读出的实验条件完全一致。在 $NA = 0.45$ 时, 虽然读出信号总体上较 $NA = 0.65$ 时弱, 但其变化率也较小, 与理论模拟的信息点读出信号强度的变化趋势(图 3(b)) 大体一致。

5 结 论

在三维数据的写入过程中, 由于光束经过两层折射率不同的介质而产生折射率失配。实验和理论分析表明, 折射率失配使 IPSF 在横向随深度变化不大, 而在轴向产生较大的变形, 从而导致轴向半高宽加宽, 信息点轴向变长, 并使信号读出强度下降。变化的程度与存储系统光学参数, 如物镜数值孔径、介质的折射率及信息点的存储深度密切相关。理论分析表明选取合适的光学参数, 能够使 IPSF 的分布在一定深度内满足三维信息存储的要求。

参考文献:

- [1] PARTHENOPOULOS D A, RENTZIPIS P M. Three dimensional optical storage memory[J]. *Science*, 1989, 245(25): 843-845.
- [2] XIA A D, WADA S, TASHIRO H. Optical data storage in C60 doped polystyrene film by photooxidation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73(10): 1323-1325.
- [3] PUDAVAR H E, PUDAVAR H E, JOSHI M P. High density three dimensional optical data storage in a stacked compact disk format with two photon writing and single photon readout[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 74(9): 1338-1340.
- [4] TORIUMI A, KAWATA S, GU M. Reflection confocal microscope readout system for three dimensional photochromic optical data storage[J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23(24): 1924-1926.
- [5] 周拥军, 陈德强, 黄文浩, 等. 共聚焦激光扫描荧光显微镜扫描系统研制[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6): 582-587. ZHOU Y J, CHEN D Q, HUANG W H, *et al.* Development of the scanning system for confocal laser scanning fluorescence microscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6): 582-587. (in Chinese)
- [6] 陈德强, 周拥军, 黄文浩, 等. 双光子激光扫描显微镜中折射率失配引起的图像变形研究[J]. *光子学报*, 2000, 29(12): 232-236. CHEN D Q, ZHOU Y J, HUANG W H, *et al.* Image distortions of two photon laser scanning microscopy induced by refractive index mismatch of coverslips[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(12): 232-236. (in Chinese)
- [7] ZHOU Y J, CHEN D Q, HUANG W H, *et al.* , An alternative method for simulating IPSF in two photon laser scanning microscopy[J]. *SPIE*, 2002, 4927: 413-420.
- [8] TOROK P, VARGO P, LACZIK Z, *et al.* Electromagnetic diffraction of light focused through a planar interface between materials of mismatched refractive indices: an integral representation[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1995, 12(2): 325-332.
- [9] KAWATA Y, UEKI H, HASHIMOTO Y, *et al.* Three dimensional optical memory with a photorefractive crystal[J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34(20): 4105-4110.
- [10] JIANG ZH W, ZHOU Y J, YUAN D J, *et al.* A two photon laser system for three dimensional microfabrication and data storage[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, 20(11): 2126-2129.
- [11] 周拥军, 唐火红, 蒋中伟, 等. 用于三维光学信息存储和微细加工研究的共聚焦激光扫描荧光显微镜[J]. *电子显微学报*, 2003, 22(6): 551-552. ZHOU Y J, TANG H H, JIANG ZH W, *et al.* Confocal laser scanning fluorescence microscope for three dimensional optical data storage and micro fabrication[J]. *J. Chin. Electr. Microsc. Soc.*, 2003, 22(6): 551-552. (in Chinese)

作者简介: 周拥军(1971-), 男, 河北邯郸人, 1993年毕业于重庆大学机械工程一系, 现为中国科技大学精密机械及精密仪器系博士研究生, 主要研究方向为光机电一体化、三维光学信息存储及三维光学微细加工。E-mail: yjz@mail.ustc.edu.cn