

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0435-04

双波长单光束双光子三维光存储模型分析*

廖宁放** 巩马理 徐端颐 齐国生

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

提要 提出一种基于波长分区物镜结构的双波长单光束双光子三维存储系统的写入方法;给出了相应的双光子记录强度空间分布模型;对该模型进行了数值仿真研究。仿真结果表明,采用本文提出的双波长单光束写入方法,可以有效提高双光子光存储的层间分辨率。

关键词 双光子存储;激光聚焦;超快激光;非线性吸收

中图分类号 TN249

文献标识码 A

Analysis of Two-Photon Optical Data Storage Using a Double-Wavelength Single-Beam Focusing Scheme

LIAO Ning-fang GONG Ma-li XU Duan-yi QI Guo-sheng

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract A novel double-wavelength single-beam two-photon bit-by-bit recording scheme that employs a special optical wavelength-division aperture in its beam focusing system is proposed. The simulation results show that, by properly selecting the configuration of a wavelength-division aperture and the power ratio of the two laser beams, our new scheme can achieve a much smaller recorded bit than a conventional single-beam two-photon recording scheme, especially in the longitudinal direction. It means that our new approach improves the two-photon recorded data density on a large scale.

Key words two photon; optical data storage; numerical simulation; laser focusing

1 引言

双光子三维存储概念首先由 University of California 的 Parthenopoulos 和 Rentzepis 于 1989 年提出^[1]。迄今为止,国际上主要有两种双光子存储方案。第一种是双光束逐页写入方案^[2],该方案在记录光学系统中采用倍频、分束、时间延迟、整形等手段,使两束相互垂直的、不同波长的超快激光脉冲同时作用在存储介质内部的一个平面上,从而实现双光子记录。由于双光束逐页记录方案仅仅在两束光的交叉区域产生双光子吸收,因此有利于克服记录的层间串扰,提高层间分辨率;但它的光学系统比较杂,而且难以兼容当前的数字光盘系统模式。第二种是单光束逐点记录方案^[3-5],该方式采用单波长写入光束,经单一物镜系统聚焦后,在存储介质体

内产生倍频效应并实现双光子写入。显然这种单光束逐点记录方案的结构较为简单,且容易与现行光盘系统结构兼容。但是,从原理上看,单光束逐点记录方案存在自身的弱点。首先,由于写入光束是相干波,且都集中在一条光路上,因此多层记录过程的层间串扰现象比较严重。其次,在很多情况下,单光束方案的双光子写入波长容易与存储材料的记录态吸收峰波长相互重迭,此时就会出现边写入边擦除的现象,因此也不利于多层存储。

为了解决单光束逐点记录方案的上述问题,本文提出一种双波长单光束逐点记录方案,它的主要特点是在单路写入光束中同时采用两种不同波长的激光,并通过对聚焦物镜表面光谱透过率结构的特殊设计,使两种波长的激光束在焦点附近产生重迭。从原理上分析,上述两种波长的激光互不相干,因此该方案不但可以克服单波长双光子方案面临的问题,同时还容易与现行光盘系统结构兼容。

* 国家重点基础研究 973 项目(G19990330)“超高密度、超快速度光信息存储和处理基础研究”的资助课题。

** 北京理工大学颜色科学与工程实验室,北京 100081

2 基本原理

双波长单光束双光子逐点记录方案的光束聚焦原理如图 1 所示。图 1(a)记录光 λ_1 和 λ_2 是波长不相同的同轴激光脉冲,它们被物镜系统同时聚焦到存储介质内部的物镜焦点,并在焦点处形成双光子记录。图 2(b)~图 2(d)分别表示单区,二区,四区等三种物镜的表面分区情况。由此可知,输入的双波长激光束首先在物镜表面被分割为若干对称光

束,然后由物镜聚焦。需要指出,单区物镜的整个表面同时允许两种波长的激光通过,因此它充分利用了整个物镜的通光孔径;但当 λ_1 和 λ_2 相隔太远时,单区物镜存在色差校正等方面的困难。二区或四区物镜则不存在上述问题。与单区物镜相比,二区或四区物镜的通光口径将损失一半。但是本文以下将会证明,通过调整 λ_1 和 λ_2 的光强比例,用多区物镜可以得到与单区物镜相同的双光子记录分辨率。

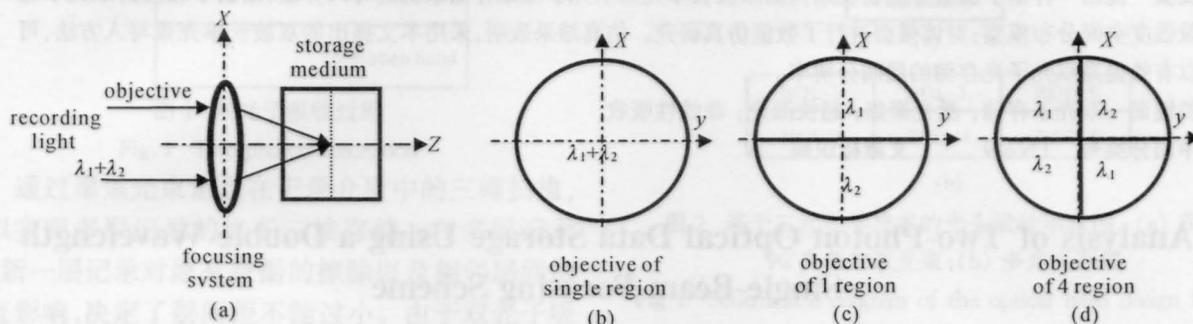


图 1 单光束双波长双光子逐点记录方案光学原理。(a) 光束聚焦原理; (b)、(c)、(d) 物镜分区原理

Fig. 1 Principle of a double-wavelength single-beam focusing system for two-photon optical storage. (a) Beam focusing principle; (b) single-division aperture; (c) two-division aperture; (d) four-division aperture

3 记录的空间分布模型

根据原子的光吸收基本理论,单光子过程的吸收率与光照强度成正比,而双光子过程的吸收率与光照强度的平方成正比。因此,设均匀存储介质的

单吸收截面为 $A(\lambda)$, 双光子吸收截面为 $B(\lambda)$, 存储状态转换过程的量子效率为 q , 物镜焦点附近的光强分布为 $I(x, y, z)$, 则当忽略多路散射等其它因素影响后,上述系统的记录信号在三维空间的分布模型如下。对于单波长双光子记录:

$$S_{\lambda_1}(x, y, z) = kq \left[A(\lambda_1) I_{\lambda_1}(x, y, z) + B\left(\frac{\lambda_1}{2}\right) \left| \frac{I_{\lambda_1}(x, y, z)}{2} \right|^2 \right] \quad (1)$$

对于双波长双光子记录:

$$S_{\lambda_1+\lambda_2}(x, y, z) = kq \left[A(\lambda_1) I_{\lambda_1}(x, y, z) + A(\lambda_2) I_{\lambda_2}(x, y, z) + B\left(\frac{\lambda_1}{2}\right) \left| \frac{I_{\lambda_1}(x, y, z)}{2} \right|^2 + B\left(\frac{\lambda_2}{2}\right) \left| \frac{I_{\lambda_2}(x, y, z)}{2} \right|^2 + B\left(\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}\right) I_{\lambda_1}(x, y, z) I_{\lambda_2}(x, y, z) \right] \quad (2)$$

其中 k 为归一化系数。注意在(1)式,(2)式中考虑了三种激发过程,即单光子吸收, λ_1 或 λ_2 单独产生的双光子吸收; λ_1 和 λ_2 共同产生的双光子吸收。在实际应用中,应当选择记录光的波长使其避开存储材料的吸收区域,使得 $A(\lambda)$ 接近于零。这样在(1)式,(2)式中只需要考虑双光子吸收项。

空间的分布情况。由传统光学衍射理论可知,衍射屏附近的光场分布可以由 Fresnel-Kirchhoff 衍射积分公式进行计算。但是在我们的系统中,还要考虑光束在存储介质表面的折射所带来的像差,因此不

4 数值分析方法

由(1)式,(2)式可知,当材料的吸收截面系数 $A(\lambda)$, $B(\lambda)$ 以及量子转换效率 q 一定时,就可以由光场分布 $I(x, y, z)$ 得到双光子记录在 XYZ 三维

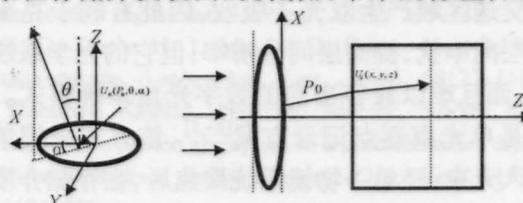


图 2 分区物镜光场分布的光路计算原理

Fig. 2 The ray principle for computing the focusing intensity of the objective lens

存在解析的光场计算表达式。为此本文采用一种离散的衍射光场计算模型,其原理如图 2 和(3)式所示。该计算模型的基本思想是:利用“Huygens-Fresnel”原理以及光线追迹方法计算出每一条衍射光线 P_0 在存储介质体内的落点坐标 (x, y, z) 及其

振动相位 $U_d(x, y, z)$,然后采用矢量叠加的方法计算出每一点的合振动矢量,该合振动矢量模的平方就是光强值。显然,当计算光线的数量足够大时,计算结果的精度就可以满足使用要求。

$$I(x, y, z) = |U_d(x, y, z)|^2 = \left| \sum_{P_0} \sum_{\theta} \sum_{\alpha} U_0(P_0, \theta, \alpha) \right|^2 \quad (3)$$

$P_0 \in \text{aperture}, 0 \leq \theta \leq \theta_{\max}, 0 \leq \alpha \leq 2\pi$

5 仿真结果分析

采用(3)式以及(1)、(2)式表达的信号分布模

型,分别对单区单波长、单区双波长以及四区双波长等情况下物镜焦点附近的双光子信号的空间分布进行仿真计算。结果分别列于表 1,表 2,图 3 和图 4。

表 1 物镜焦平面上双光子记录光斑横向尺寸的仿真结果

Table 1 The simulation parameters and results for the two photon recordings on the focal plane of the lens

Simulation parameters				Recording sizes (50% intensity)	
numerical number	lens division method	laser wavelength	beam proportion $I_{\lambda_1} : I_{\lambda_2}$	$x / \mu\text{m}$	$y / \mu\text{m}$
0.8	single-division single-wavelength	$\lambda_1 = 800 \text{ nm}$		0.42	0.42
0.8	single-division double-wavelength	$\lambda_1 = 532 \text{ nm}, \lambda_2 = 1064 \text{ nm}$	5:1	0.35	0.35
0.8	two-division double-wavelength	$\lambda_1 = 532 \text{ nm}, \lambda_2 = 1064 \text{ nm}$	5:1	0.71	0.37
0.8	four-division double-wavelength	$\lambda_1 = 532 \text{ nm}, \lambda_2 = 1064 \text{ nm}$	5:1	0.36	0.36

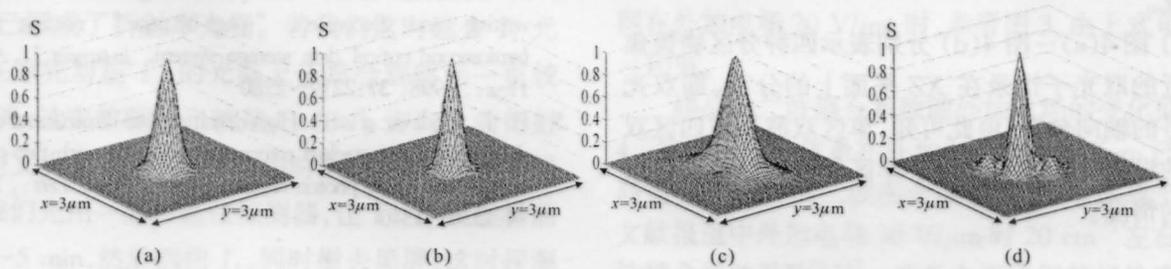


图 3 物镜焦平面(XY)的双光子信号分布。(a)单区单波长;(b)单区双波长;(c)二区双波长;(d)四区双波长

Fig.3 The two photon recordings on a XY plane near the focus of the lens. (a) single-division and single wavelength; (b) single-division and double-wavelength; (c) two-division and double-wavelength; (d) four-division and double-wavelength

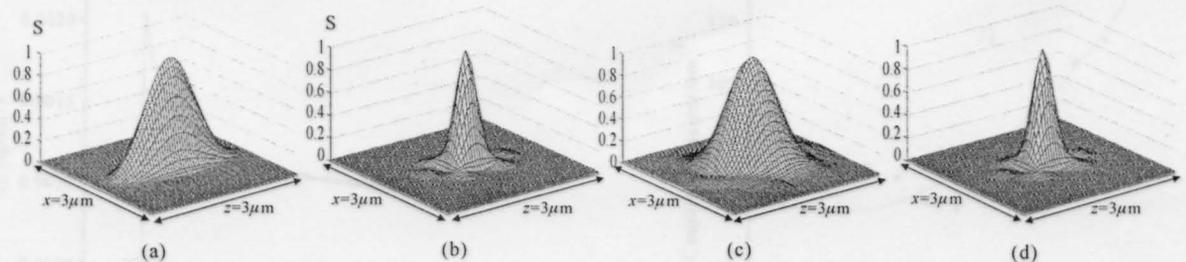


图 4 物镜焦点附近 XZ 面(Y=0)双光子信号分布情况。(a)单区单波长;(b)单区双波长;(c)二区双波长;(d)四区双波长

Fig.4 The two photon recordings on a XZ plane near the focus of the lens. (a) single-division and single-wavelength; (b) single-division and double-wavelength; (c) two-division and double-wavelength; (d) four-division and double-wavelength

表 2 物镜焦点附近 XZ 面 ($Y=0$) 双光子记录光斑轴向尺寸的仿真结果Table 2 The simulation parameters and results for the two photon recordings on a XZ plane ($Y=0$) near the focus of the lens

Simulation parameters				Recording size (50% intensity)
numerical number	lens division method	laser wavelength	beam proportion $I_{\lambda_1} : I_{\lambda_2}$	z-direction / μm
0.8	single-division single-wavelength	$\lambda_1 = 800 \text{ nm}$		1.17
0.8	single-division double-wavelength	$\lambda_1 = 532 \text{ nm}, \lambda_2 = 1064 \text{ nm}$	5:1	0.44
0.8	two-division double-wavelength	$\lambda_1 = 532 \text{ nm}, \lambda_2 = 1064 \text{ nm}$	5:1	0.61
0.8	four-division double-wavelength	$\lambda_1 = 532 \text{ nm}, \lambda_2 = 1064 \text{ nm}$	5:1	0.45

6 结果分析

1) 图 3(a)~图 3(d)分别表示四种分区物镜焦点处 XY 平面上的双光子记录分布,即双光子信号的横向分布。由此可知,单区双波长和四区双波长的光斑尺寸明显小于其它情况。二区双波长的光斑最大,且 X 方向尺寸大约为 Y 方向的二倍。此外要注意四区双波长的光斑存在较大的旁瓣。

2) 表 1 列出了与图 3 结果相对应的仿真参数以及 50% 信号强度所对应的光斑横向尺寸。注意其中 532 nm 光束与 1064 nm 光束的输入强度比例为 5:1。数据表明,单区双波长和四区双波长的横向光斑尺寸基本相同,而且都明显优于单区单波长的情况。

3) 图 4(a)~图 4(d) 分别表示四种分区物镜焦点附近的双光子记录在 XZ 平面上的分布,即双光子信号的轴向分布。由此可知,单区双波长或四区双波长的纵向分辨率明显优于单区单波长以及二区双波长的情况。

4) 表 2 列出了与图 4 结果相对应的仿真参数以及 50% 信号强度所对应的光斑轴向尺寸。数据表明,单区双波长和四区双波长的纵向光斑尺寸基本相同,且它们的纵向分辨率比单区单波长的情况提高三倍左右。

参 考 文 献

- 1 D. A. Parthenopoulos, P. M. Rentzepis. Three-dimensional optical storage memory. *Science*, 1989, **245**:843~845
- 2 A. S. Dvornikov *et al.*. Materials and systems for two photon 3-D ROM devices. *IEEE Transactions on Computers, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A*. 1997, **20**:203~210
- 3 Y. Kawata. Use of two-photon absorption in a photorefractive crystal for three-dimensional optical memory. *Opt. Lett.*, 1998, **23**:756~758
- 4 N. I. Koroteev *et al.*. Two-photon single-beam "bit-by-bit" writing and fluorescent "page-by-page" reading 2.5D femtosecond optical data storage system. *Japanese J. Appl. Phys.*, 1998, **37**:2279~2280
- 5 H. E. Pudavar *et al.*. High-density three-dimensional optical data storage in a stacked compact disk format with two-photon writing and single photon readout. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**:1338~1340



图 3 物镜焦点附近 XY 平面上的双光子记录分布,即双光子信号的横向分布。图 3(a)~图 3(d)分别表示四种分区物镜焦点附近的双光子记录在 XY 平面上的分布,即双光子信号的横向分布。由此可知,单区双波长和四区双波长的光斑尺寸明显小于其它情况。二区双波长的光斑最大,且 X 方向尺寸大约为 Y 方向的二倍。此外要注意四区双波长的光斑存在较大的旁瓣。