

# Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> 光学非线性纳米薄膜的超分辨效应

翟凤潇<sup>1</sup> 张奎<sup>2</sup> 王阳<sup>2\*</sup> 吴谊群<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 郑州轻工业学院物理与电子工程学院, 河南 郑州 450002  
<sup>2</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 利用 Z-扫描测试技术研究了低功率下 Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> 纳米薄膜的非线性光学特性, 并利用椭圆偏振光谱仪测量了薄膜光学常数及椭偏参数。实验结果表明 Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> 薄膜具有较大的饱和非线性光学吸收, 非线性系数约为 -0.018 m/W, 而非线性折射率效应却不明显。Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> 纳米薄膜的超分辨效应主要在于具有大的非线性吸收系数。理论计算表明 35 nm 厚薄膜可使高斯光束半径缩小大约 10%。因此 Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> 薄膜有望用于近场超分辨结构。

**关键词** 薄膜; Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> 薄膜; 超分辨效应; Z 扫描测量; 光学非线性

**中图分类号** O484.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0707002

## Super-Resolution Effect of Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> Optical Nonlinearity Nanofilms

Zhai Fengxiao<sup>1</sup> Zhang Kui<sup>2</sup> Wang Yang<sup>2</sup> Wu Yiqun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Physics and Electronics Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** A Z-scan system is employed to investigate optical nonlinearity of Bi<sub>20</sub>Sb<sub>80</sub> thin films under low laser intensity. Optical constants and ellipsometric parameters are measured by spectroscopic ellipsometry. Experimental results indicate that Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> films show giant nonlinear saturated absorption. The nonlinear absorption coefficient is about -0.018 m/W. However, there is no appreciable nonlinear refraction effect in measurement. The giant nonlinear saturated absorption is dominant response for super-resolution effect. The calculation result indicates that the squeezed half width of Gaussian spot with about 10% can be achieved in Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> films with thickness of 35 nm. The Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> nanofilms are shown to be very promising for super-resolution applications.

**Key words** thin films; Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> films; super-resolution effect; Z-scan measurement; optical nonlinearity

**OCIS codes** 310.6860; 190.4400; 160.4760; 210.4245

## 1 引言

近场超分辨技术可以突破光学衍射极限, 在纳米光刻、纳米制造以及纳米信息存储等领域具有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>。在近场超分辨结构技术中, 非线性掩膜材料是实现超分辨技术的关键。最早用于超分辨结构的掩膜层材料是半金属 Sb<sup>[1]</sup>。对于 Sb 在超分辨近场结构中的工作机理, 虽然研究人员提出了各种不同的观点, 但是他们都认为薄膜的光学和光热非线性特性与其作为超分辨掩膜的能力密切

相关<sup>[4-7]</sup>。因此, 许多具有非线性光学特性的材料被用于超分辨近场结构<sup>[8-12]</sup>。

Sb<sub>x</sub>Bi<sub>1-x</sub> 薄膜具有较低的熔点温度和较大的光学非线性特性<sup>[13-14]</sup>, 因此也被用作近场超分辨掩膜结构<sup>[15-16]</sup>。前期的研究结果表明 Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> 纳米薄膜具有较强的光热非线性响应、快速光热开关特性和较好的重复稳定性<sup>[17-18]</sup>。这说明 Sb<sub>80</sub>Bi<sub>20</sub> 薄膜有望用于新型超快光存储超分辨结构, 然而目前对于该材料的超分辨实现机制尚不清楚。文献<sup>[19-20]</sup>研

**收稿日期**: 2014-01-08; **收到修改稿日期**: 2014-02-12

**基金项目**: 国家自然科学基金(61178059, 31201377)、河南省教育厅重点科学技术研究计划(14A430035)、郑州轻工业学院博士基金(2010BSJJ031)

**作者简介**: 翟凤潇(1979-), 男, 博士, 讲师, 主要从事信息存储方面的研究。E-mail: fxzhai2008@hotmail.com

**通信联系人**。E-mail: ywang@siom.ac.cn

究了不同成分  $Sb_xBi_{1-x}$  合金的光学常数及结构。本文利用 Z 扫描测试技术,研究了  $Sb_{80}Bi_{20}$  在低功率激光作用下的非线性吸收特性。研究结果表明  $Sb_{80}Bi_{20}$  主要是非线性饱和吸收主导的超分辨效应。研究结果将为发展新型快速开关掩膜材料和理解  $Sb_{80}Bi_{20}$  作为超分辨掩膜的工作机理提供帮助。

## 2 实 验

### 2.1 样品制备

$Sb_{80}Bi_{20}$  薄膜样品利用真空磁控溅射仪(沈阳科学仪器厂、JGP560 型)溅射沉积在处理干净的 K9 玻璃基片上。溅射靶材采用 BiSb 合金靶。在本底气压为  $2 \times 10^{-4}$  Pa,工作气压为 0.8 Pa,80 sccm(标准状态下 80 ml/min)氩气流量条件下,用 30 W 直流溅射功率 100 V 负偏压进行溅射沉积。通过溅射时间控制薄膜厚度,本实验中所用薄膜厚度约为 35 nm。

### 2.2 性能测试

本文的 Z-扫描测试实验装置细节如文献[17]描述。激发光源为 He-Ne 气体激光器发出的波长为 632.8 nm 的连续激光。利用声光调制器调制宽度成 50 ns 的激光脉冲。激光被分束器分为两束,一束作为参考光束。聚焦透镜的数值孔径为 0.09。扫描光束在焦点处的束腰半径  $\omega_0 = 4.3 \mu\text{m}$ ,系统的衍射深度  $z_0$  ( $z_0 = k\omega_0^2/2$ ) 为  $91.3 \mu\text{m}$ 。样品放置在由步进电机驱动样品架上,步进电机的运动由电脑控制。样品的反射和透射光信号分别被光电探测器接收。

利用椭圆偏振光谱仪(SOPRA 公司, GES5E 型)测量薄膜在波长范围为 400~800 nm 的椭圆偏参数  $\tan(\Phi)$  和  $\cos(\Delta)$ 。光学常数通过 WinElli 2 软件拟合得到。利用原子力显微镜(Veeco 公司, Multimode V 型)观察薄膜表面的微观表面结构,原位测试了椭圆偏参数在 50 °C~500 °C 范围随温度的变化关系。

## 3 结果与讨论

图 1 所示为利用原子力显微镜扫描的样品薄膜表面形貌。微区表面结构显示薄膜表面有少量岛状结构,薄膜表面粗糙度较小。通过原子力形貌观察可知样品具有较好的薄膜质量。椭圆偏光度法可以精确表征薄膜表面的光学性质。图 2 所示为椭圆偏振光谱仪测得的在 s 可见光区(400~800 nm)的光学常数(折射率  $n$  和消光系数  $k$ )以及所对应的吸收系数  $\alpha$  ( $\alpha = 4\pi k/\lambda_0$ , 其中  $k$  为消光系数,  $\lambda_0$  为波长)。

图 2 显示,随着波长的变化,折射率和消光系数具有相同的变化趋势,都是随着波长的增加而增大。吸收系数随波长的增加而减小。

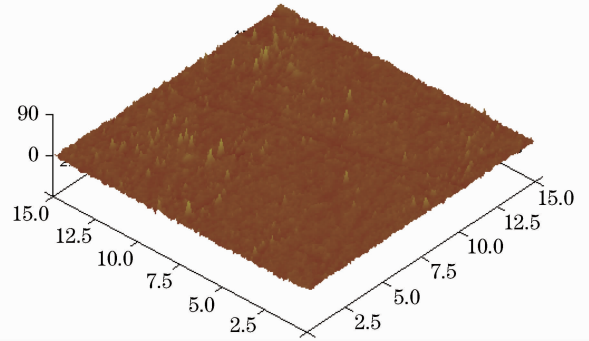


图 1  $Sb_{80}Bi_{20}$  薄膜原子力形貌图

Fig. 1 Atomic force microscopy (AFM) image of  $Sb_{80}Bi_{20}$  films

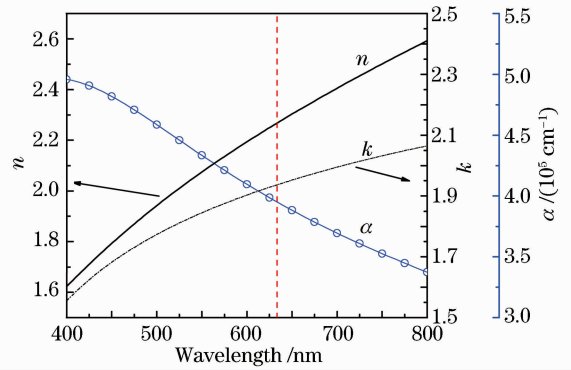


图 2 薄膜的光学常数及吸收系数与波长关系曲线  
Fig. 2 Wavelength dependent optical constants and absorption coefficient of  $Sb_{80}Bi_{20}$  films

图 3 所示为 Z-扫描测试得到的透射强度与位置的关系曲线。扫描激光调制为宽度为 50 ns 的脉冲,激光功率密度为  $5.0 \times 10^8 \text{ W/m}^2$ 。在测试过程

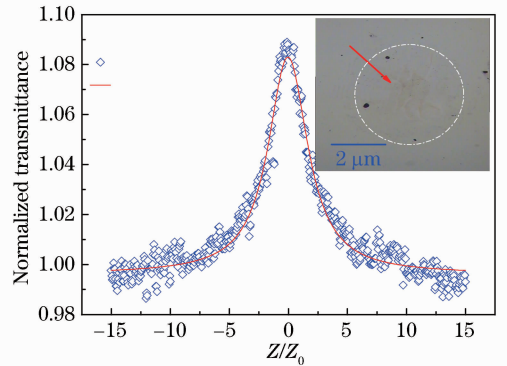


图 3 薄膜的非线性饱和吸收 Z 扫描曲线及对应的光学图片

Fig. 3 Nonlinear saturated absorption curve of  $Sb_{80}Bi_{20}$  film by Z-scan measurement and corresponding optical microscope images

中,样品在聚焦物镜衍射长度附近沿  $Z$  向移动。激光扫描区域的光学显微图像也显示在图 3 中。从图中可以看出透射强度曲线在聚焦透镜焦点处有较强的透射峰,说明  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  具有典型的非线性饱和吸收特性。而在测试过程中没有发现明显的非线性折射率变化,这可能是因为在低激光强度作用下,其非线性折射率变化较小而难以探测。

通过对透射曲线进行理论拟合可以得到非线性吸收系数。图 3 中实线为理论拟合曲线,拟合得到非线性吸收系数  $\beta$  为  $-1.8 \times 10^{-2} \text{ m/W}$ 。与通常的非线性吸收材料相比, $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  非线性吸收系数非常大<sup>[21-22]</sup>。Wei 等<sup>[23-24]</sup> 研究结果表明 AgSi 具有较大的非线性吸收系数,通过扫描光学显微镜直接观察发现 AgSi 薄膜对入射高斯光斑具有明显的压缩作用。实验结果表明  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  薄膜与文献<sup>[23]</sup> 中报道的 AgSi 复合薄膜具有类似的非线性光学特性。非线性掩膜材料工作机制是基于激光诱导的不同结构之间的光谱特性差异。根据文献研究结果,在 Sb 和 Si 薄膜中对光斑压缩的主要工作机理在于材料具有大的非线性折射率变化<sup>[6,25]</sup>,这种折射率变化在高斯光斑照射区域形成等效聚焦透镜作用。AgSi 薄膜对光斑的压缩主要是材料巨大的饱和非线性吸收。在高斯光斑的照射下,强度高的中心区域对应高的透射率,从而形成光强调制的透光区域。

为深入理解  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  薄膜的非线性光学变化,利用原位椭圆偏参数变温测量方法测试了椭圆偏参数与温度的变化关系。图 4 所示为椭圆偏参数随温度的变化曲线。从图中可以看出,在温度低于  $430^\circ\text{C}$  范围内,椭圆偏参数不变。在  $430^\circ\text{C}$  时,椭圆偏参数有明显变化,说明此时薄膜的光学性质特别是光学常数发生

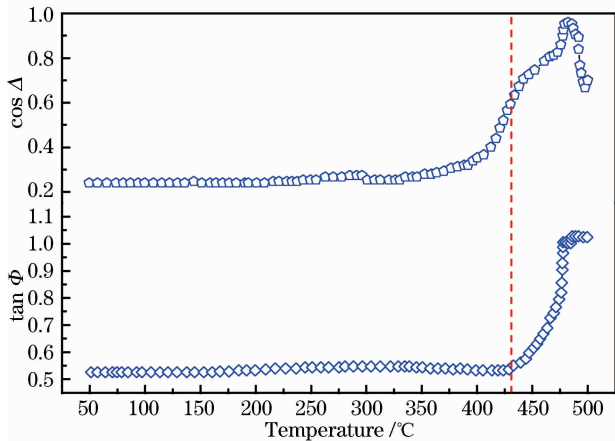


图 4 椭圆偏参数随温度变化曲线

Fig. 4 Temperature dependent ellipsometric parameters of  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  films

了变化。对照变温反射和热分析可知,此时薄膜发生了熔化<sup>[17-18]</sup>。图 3 中光学图像显示激光照射区域有明显的表面形貌变化,这是由于薄膜固化的结果。 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  较低的熔点温度和较小热导率,对于厚度远小于衍射深度的薄膜,加热到熔点温度时间约为  $10 \text{ ns}$ ,因此认为  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  巨大的非线性吸收是由于薄膜从固态到融化态结构变化引起的。

为研究非线性吸收薄膜对光斑的压缩效应,首先计算薄膜在高斯光斑照射区域的透射率。近场超分辨结构中,掩膜层厚度  $d$  为几个纳米到数十纳米。考虑反射光和透射光的位相变化及在薄膜中的光程差  $2nd \approx \lambda_0$ ,因此在计算透射率时要考虑光多次反射引起的干涉效应。薄膜衬底 K9 玻璃厚度为  $1.2 \text{ mm}$ ,因此不满足相干条件。由于吸收作用,激光通过薄膜后振幅变化可表示为

$$E = \exp(-ad/2)\exp(i\delta), \quad (1)$$

式中位相因子  $\delta = 2nd\pi/\lambda_0$ 。将多次透射系数叠加可得薄膜透射系数

$$\tilde{\tau} = \frac{(1-r_{12}^2)E}{1-(r_{12}E)^2}, \quad (2)$$

式中  $r_{12}$  为薄膜界面的反射系数。对透射系数取模平方,可得薄膜的透射率

$$T = \tilde{\tau}\tilde{\tau}^* = \left| \frac{(1-r_{12}^2)E}{1-(r_{12}E)^2} \right|^2. \quad (3)$$

由于  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  薄膜具有非常大的非线性吸收系数,在激光照射下,薄膜的吸收系数可以表示为

$$\alpha(r) = \alpha_0 + \beta I(r), \quad (4)$$

式中  $\alpha_0$  为线性吸收系数, $\beta$  为非线性吸收系数。入射光强度  $I(r) = I_0 \exp(-2r^2/\omega_0)$  为高斯分布,因此薄膜的吸收系数在高斯光斑照射下,也表现为高斯分布。根据实验条件,设入射光斑中心强度  $I_0 = 5.0 \times 10^8 \text{ W/m}^2$ 。计算所用参数在表 1 中列出。图 5 所

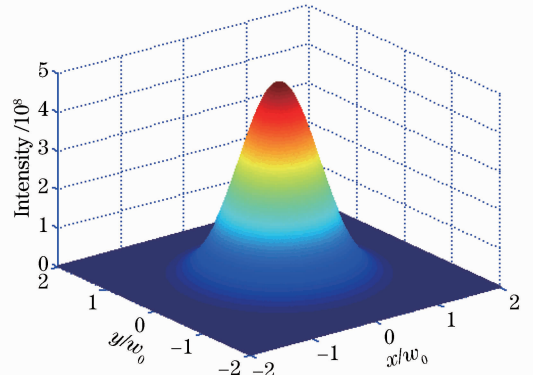


图 5 入射光斑强度二维分布

Fig. 5 Two dimensional intensity distribution of input laser spot

示为入射光强度分布。如果不考虑非线性吸收系数随入射光强度变化,根据(4)式计算的非线性吸收系数分布如图6所示,在高斯光斑照射区域形成明显的非均匀吸收分布。

表1 计算参数

Table 1 Parameters for calculations

$n$	2.23	$\omega_0/\mu\text{m}$	1.0
$k$	1.94	$d/\text{nm}$	35
$\alpha_0/\text{cm}^{-1}$	$3.85 \times 10^5$	$\lambda_0/\text{nm}$	632.8
$\beta/(\text{m}/\text{W})$	-0.018		

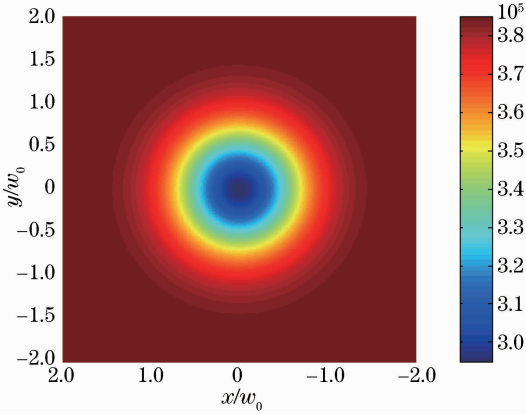


图6 激光照射下吸收系数分布

Fig. 6 Calculated absorption coefficient distribution induced by laser

根据薄膜的透射率,可以得到透射光强分布,即

$$I_t(r) = I(r) \cdot T(r), \quad (5)$$

结合(1)~(4)式,得到透射光强度分布如图7所示,由于 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ 非线性吸收效应,透射光斑半峰全宽变小。为比较 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ 薄膜非线性吸收引起的光斑变化,图8所示为入射光斑(实线)与透射光斑(点划线)的归一化强度分布。从图中可以看出,由于薄膜非线性吸收引起的光斑半峰全宽压缩大约10%,这与 $\text{AgSi}$ 薄膜中用近场光学扫描显微镜直接观察的

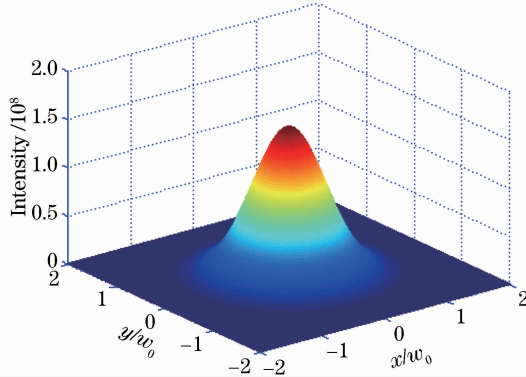


图7 透射光斑强度分布

Fig. 7 Calculated intensity distribution of transmittance spot

结果十分相近<sup>[23]</sup>。

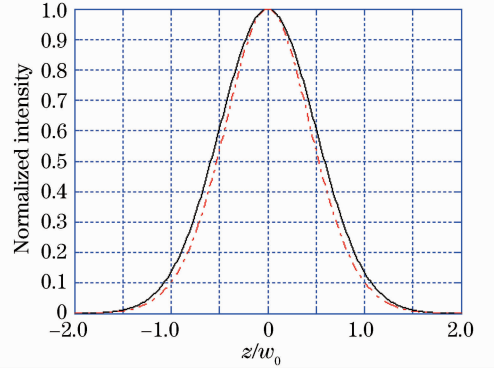


图8 入射光斑和透射光斑归一化光强截面分布曲线  
Fig. 8 Cross-section distribution of normalized input and transmittance

理论计算结果表明 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ 非线性吸收薄膜具有明显的光斑压缩效应,因此可用于近场超分辨结构掩膜层。对 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ 作为掩膜层的超分辨性能进行了静态记录和动态读出测试。在静态测试实验中采用“玻璃基底(0.17 mm)/SiN(170 nm)/ $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ (35 nm)/SiN(20 nm)/AgInSbTe(50 nm)”的超分辨结构和“玻璃基底(0.17 mm)/SiN(170 nm)/AgInSbTe(50 nm)”结构。图9所示为静态记录实验结果。从图9(a)中可以看出,激光直接在相变层AgInSbTe上形成的记录点直径约为1200 nm。图9(b)所示为在相同的记录条件下利用 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ 作为掩膜形成的记录点,其直径约为1000 nm。静态实验结果表明利用 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ 可以得到直径缩小16.7%的记录点。实验结果表明其超分辨效应高于理论计算的光斑压缩效应。主要原因可能是在计算时没有考虑非线性吸收系数随激光功率的变化;AgInSbTe具有反饱和和吸收特性,作为记录层时可以进一步压缩有效吸收光斑直径<sup>[26]</sup>。

动态读出装置使用的激光波长 $\lambda = 780 \text{ nm}$ ,物镜的数值孔径 $NA = 0.45$ ,动态读出的极限 $\lambda/4NA = 433 \text{ nm}$ 。35 nm厚的 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ 沉积在预刻有380 nm信息点的只读式光盘上。当读出功率为3 mW,改变盘片转速时的读出性能实验结果如图10所示,其中内插图是转速为3 m/s时的频谱。实验结果表明光盘上小于装置动态读出的极限的记录点可被成功读出,并获得不低于20 dB载噪比。 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ 实现超分辨动态读出的原理可以用激光作用下的热虹蚀模型解释<sup>[15-16]</sup>。由于 $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$ 薄膜具有较强的非线性饱和吸收,当激光照射在高速旋转的光盘表面时,光斑后部的温度超过薄膜的熔点而熔化,而光点前部

的温度仍然保持在熔点以下,这样在光斑前部形成缩小的读出光斑。动态实验结果表明  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  具有

超分辨应用的可能性。

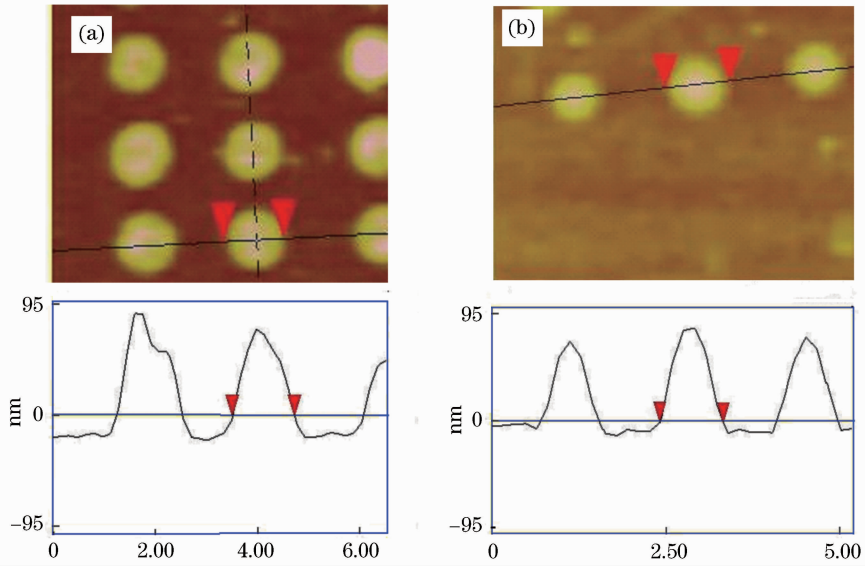


图9 (a)不使用及(b)使用  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  作为掩膜层时的静态记录特性

Fig. 9 Experimental result of static recording (a) without and (b) with  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  as the mask layer

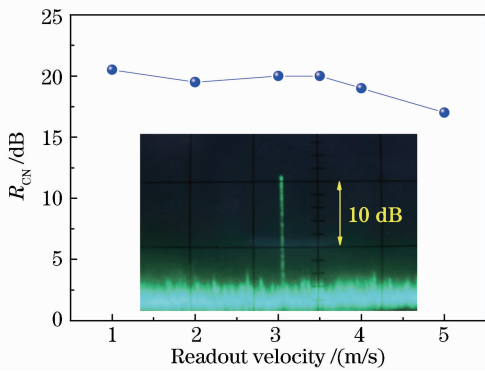


图10 超分辨读出性能

Fig. 10 Super-resolution readout properties

## 4 结 论

利用 Z-扫描技术研究了  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  薄膜在低激光功率非线性光学特性。结果表明,  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  薄膜具有较大的非线性吸收系数,而非线性折射率变化却不明显。结合原位变温椭圆偏参数测试结果可知,主要原因是由于薄膜在激光作用下从固体到熔化态结构的转变。根据实验参数计算了薄膜对高斯光斑的压缩效应,结果表明通过薄膜后光斑半径缩小约 10%,如对薄膜结构和激光参数进行优化,有望获得更好的结果。通过实验结果表明,  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  实现超分辨的工作机理为薄膜的非线性光热特性,在入射光斑中心处形成小于原始光斑饱和非线性吸收区域,对入射光斑起到压缩作用。静态记录和动态读出实验

结果表明  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  具有明显的超分辨功能。由于具有快速的开关速度和光学稳定性,有望用于近场超分辨结构。研究结果将为发展新型超分辨结构和理解  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  薄膜的超分辨效应工作机理奠定基础。

## 参 考 文 献

- 1 Tominaga J, Nakano T, Atoda N. An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with a Sb thin film[J]. Appl Phys Lett, 1998, 73(15): 2078-2080.
  - 2 Zha Y K, Wei J S, Gan F X. A novel design for maskless direct laser writing nanolithography: combination of diffractive optical element and nonlinear absorption inorganic resists [J]. Opt Commun, 2013, 304: 49-53.
  - 3 Kuwahara M, Nakano T, Tominaga J, et al.. A new lithography technique using super-resolution near-field structure [J]. Microelectronic Engineering, 2000, 53(1): 535-538.
  - 4 Ou D R, Zhu J, Zhao J H. Approach for imaging optical super-resolution based on Sb films[J]. Appl Phys Lett, 2003, 82(10): 1521-1523.
  - 5 Tsai D P, Lin W C. Probing the near fields of the super-resolution near-field optical structure[J]. Appl Phys Lett, 2000, 77(10): 1413-1415.
  - 6 Wei J S, Gan F X. Thermal lens model of Sb thin film in super-resolution near-field structure [J]. Appl Phys Lett, 2003, 82(16): 2607-2609.
  - 7 Zhai F X, Zuo F Y, Huang H, et al.. Optical switch formation in antimony Super-resolution mask layers induced by picosecond laser pulses[J]. Chin Phys Lett, 2010, 27(1): 014209.
  - 8 Zhang F, Xu W D, Wang Y, et al.. Static optical recording properties of super-resolution near-field structure with bismuth mask layer[J]. Jpn J Appl Phys, 2004, 43(11A): 7802-7806.
  - 9 Zhao Shilei, Geng Yongyou, Shi Hongren. Study on super-resolution readout performance of Si-doped Ag film[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0631004.
- 赵石磊,耿永友,施宏仁. Si 掺杂 Ag 基超分辨薄膜读出性能研究

- [J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0631004.
- 10 Wei J S, Liu S, Geng Y Y, *et al.*. Nano-optical information storage induced by the nonlinear saturable absorption effect[J]. *Nanoscale*, 2011, 3(8): 3233–3237.
  - 11 Shi L P, Chong T C, Yao H B, *et al.*. Super-resolution near-field optical disk with an additional localized surface plasmon coupling layer[J]. *J Appl Phys*, 2002, 91(12): 10209–10211.
  - 12 Pilard G, Fery C, Pacearescu L, *et al.*. Study of super-resolution read-only-memory disk with a semiconducting or chalcogenide mask layer[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2009, 48(3S1): 03A064.
  - 13 Youngdale E R, Meyer J R, Hoffman C A, *et al.*. Etalon enhancement of nonlinear optical response in  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ [J]. *Appl Phys Lett*, 1991, 59(7): 756–758.
  - 14 Youngdale E R, Meyer J R, Hoffman C A, *et al.*. Nonlinear optical properties of molecular beam epitaxy grown  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ [J]. *Appl Phys Lett*, 1990, 57(4): 336–338.
  - 15 Jiang L X, Wu Y Q, Wang Y, *et al.*. Low-power super-resolution readout with antimony bismuth alloy film as mask layer[J]. *Chin Phys Lett*, 2009, 26(2): 024214.
  - 16 Lu X M, Wu Y Q, Wang Y, *et al.*. Super-resolution readout property of bismuth-doped antimony-based thin film as a functional mask for read-only memory[J]. *Appl Phys A*, 2012, 108(4): 765–769.
  - 17 Zhai Fengxiao, Jiang Laixin, Wang Yang, *et al.*. Nonlinear optical response of  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  phase change films[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1352–1355.  
翟凤潇, 姜来新, 王 阳, 等.  $\text{Sb}_{80}\text{Bi}_{20}$  相变薄膜的非线性光学响应[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1352–1355.
  - 18 Zhai Fengxiao, Li Simian, Huang Huan, *et al.*. Transient optical response of  $\text{Bi}_{20}\text{Sb}_{80}$  thin films induced by picosecond laser pulse[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(10): 2620–2624.  
翟凤潇, 李思勉, 黄 欢, 等.  $\text{Bi}_{20}\text{Sb}_{80}$  薄膜的皮秒激光脉冲诱导瞬态光学响应[J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2620–2624.
  - 19 Xinmiao Lu, Yiqun Wu, Yang Wang, *et al.*. Optical characterization of antimony-based bismuth-doped thin films with different annealing temperatures[J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(10): 102101.
  - 20 Jiang Laixin, Lu Xinmiao, Wang Yang, *et al.*. Optical constants of antimony-bismuth alloy films[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0907001.  
姜来新, 逯鑫淼, 王 阳, 等. 铋铟合金薄膜的光学常数[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0907001.
  - 21 Wang W T, Shi C D, Su X J, *et al.*. Optical nonlinearities of  $\text{BaTiO}_3$  matrix-embedded Au nanoparticles [J]. *Materials Research Bulletin*, 2006, 41(11): 2018–2023.
  - 22 Han J B, Chen D J, Ding S, *et al.*. Plasmon resonant absorption and third-order optical nonlinearity in Ag-Ti cosputtered composited films[J]. *J Appl Phys*, 2006, 99(2): 023526.
  - 23 Wei J S, Liu J. Direct observation of below-diffraction-limited optical spot induced by nonlinear saturable absorption of Ag-doped Si nanofilms[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(18): 3126–3128.
  - 24 Wei J S, Liu J, Xiao M F. Giant optical nonlinearity of silver-doped silicon thin film at low power input: laser-triggered cluster resonance[J]. *Appl Phys A*, 2011, 104(4): 1031–1037.
  - 25 Wei J S, Xiao M F. The origin of the super-resolution via a nonlinear thin film[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(6): 1654–1661.
  - 26 Liu Jing, Wei Jingsong. Optical nonlinear absorption characteristics of  $\text{AgInSbTe}$  phase change thin films[J]. *J Appl Phys*, 2009, 106(8): 083112.

栏目编辑: 张浩佳