

# Si 掺杂 Ag 基超分辨薄膜读出性能研究

赵石磊 耿永友 施宏仁

(中国科学院上海光学精密机械研究所高密度光存储技术实验室, 上海 201800)

**摘要** 超分辨薄膜是一种能够实现突破光学衍射极限的功能薄膜,它在超分辨近场光存储技术中起到至关重要的作用。采用磁控溅射共溅的方式制备了 Ag 掺杂一定量 Si 的超分辨复合薄膜,测试了其作为掩膜层的超分辨光盘读出性能,并获得了最佳的薄膜制备条件,即当 Ag 溅射功率为 55 W, Si 为 95 W, 溅射时间为 80 s, 薄膜厚度为 39 nm 时,超分辨光盘的读出信号载噪比(CNR)最高为 28 dB。用 X 射线光电子能谱测量了上述薄膜的组成,用扫描电子显微镜观察了薄膜微区形貌,并用椭圆偏振光谱仪测量了薄膜的光学常数和厚度。超分辨复合薄膜的读出机理可以用 Ag 的散射型机理解释。光盘在持续读出 10 万次以后读出信号基本没有下降。

**关键词** 光存储;超分辨薄膜;共溅;载噪比;稳定性

中图分类号 TQ591 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0631004

## Study on Super-Resolution Readout Performance of Si-Doped Ag Film

Zhao Shilei Geng Yongyou Shi Hongren

(Research Laboratory for High Density Optical Storage, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Super-resolution film is one functional film which can overcome the optical diffraction limit, which plays an important role in super-resolution near-field technique. Si-doped Ag film is prepared by co-sputtering method and used as a mask which is measured for super-resolution read-only disk. The largest read out signal's carrier-to-noise ratio (CNR) of the super-resolution read-only disk is 28 dB under the Ag sputtering power of 55 W, the Si sputtering power of 95 W, the sputtering time of 80 s and the film thickness of 39 nm. Film component is analyzed by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). Film microstructure is demonstrated by scanning electron microscope (SEM). Optical constants and thickness of the film are measured by ellipsometer. The readout mechanism of super-resolution film can be explained with the Ag scattering model. The CNR of the super-resolution disk doesn't decrease more or less after one hundred thousand times readout.

**Key words** optical storage; super-resolution film; co-sputtering; carrier-to-noise ratio; stability

**OCIS codes** 210.0210; 310.0310; 190.0190

## 1 引 言

当今是信息发达的时代,信息技术的大力发展离不开存储技术的发展。光存储作为一门存储技术,在信息技术发展中起着举足轻重的作用。高密度、大容量是光存储技术发展的趋势,传统的远场光存储技术由于光学衍射极限的限制,记录点的直径( $D$ )取决于激光波长( $\lambda$ )和物镜数值孔径( $NA$ )即:

$D=1.22\lambda/NA$ ,从而使光盘的密度和容量的提高遇到了瓶颈<sup>[1]</sup>,这就需要一种新的光存储技术来实现高密度,大容量的存储。近场光存储技术作为近二十年来发展起来的一门技术,由于其光在传播的过程中不受衍射极限的限制,而且该技术只需在记录层上沉积一层非线性掩膜层就能达到有效减小光斑直径的目的,结构简单,实用性较强<sup>[2]</sup>,因此它对提

收稿日期: 2011-12-12; 收到修改稿日期: 2012-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(61137002,61178059)资助课题。

作者简介: 赵石磊(1986—),男,硕士研究生,主要从事超分辨薄膜方面的研究。E-mail: zhaoshilei2005@126.com

导师简介: 耿永友(1968—),男,博士,副研究员,主要从事光存储材料与技术等方面的研究。

E-mail: yyoug@siom.ac.cn(通信联系人)

高光盘的存储密度有着重要的意义<sup>[3]</sup>。Yasuda等<sup>[4]</sup>第一次将近场光存储技术中的掩膜超分辨技术应用在只读式光盘中,他们采用掩膜的方法来实现低于衍射极限的记录点的读出,随后大量的掩膜材料比如:Sb,Bi,Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>,AgO<sub>x</sub>,Ti,Bi<sub>20</sub>Sb<sub>80</sub>等为科研工作者所关注和研究<sup>[5~10]</sup>。Ag和Si在光盘生产中通常用作全反射层和半反射层,在用作超分辨掩膜材料方面,单层的Si薄膜虽然具有一定的超分辨读出性能,但是其信号稳定性差,读出信号载噪比(CNR)小;而单层的Ag虽然超分辨性能要比Si要好,但是最多也只能达到25 dB<sup>[11]</sup>,而且Ag在放置过程中容易被空气氧化从而导致读出信号的载噪比下降,因而需要增加两层介电层保护,导致光盘的制作成本大大提高,工艺也较为繁琐。本文选择Si掺杂Ag基复合薄膜作为掩膜材料,通过改变掺杂条件制备不同组分的Si掺杂Ag基复合薄膜,测试了其作为掩膜层的超分辨光盘的读出性能,获得了最佳的工艺条件,并且超分辨光盘读出信号的载噪比得到了提高。

## 2 实 验

本实验采用的光盘盘基为厚度1.2 mm,直径为120 mm的聚碳酸酯基片,在盘基上预刻有直径为390 nm(半峰全宽),深度为100 nm的信息点(见图1)。Ag和Si薄膜均采用磁控溅射方法制备,Ag靶采用进口直流电源控制,Si采用国产射频电源控制,两靶座与垂直方向倾斜角均为30°,样品在靶座的正上方,与靶座的垂直距离为15 cm,镀膜过程中样品座保持一定角速度自转,通过共溅的方法使Ag和Si沉积在盘基的信息面上,其光盘结构如图2所示。本实验采用的溅射设备为:沈阳科学仪器厂JGP560型超高真空磁控溅射镀膜机,实验的本底真空度优于 $3 \times 10^{-4}$  Pa,工作气体Ar气流量85 sccm,溅射气压0.85 Pa。光盘信号的测试是在图3的装置上测试进行,该装置激光波长( $\lambda$ )为780 nm,数值孔径为0.4,激光束聚焦在光盘上的光斑尺寸( $D=1.22\lambda/NA$ )为 $2.380 \mu\text{m}$ ,该装置的动态读出分辨极限( $D/4$ )为595 nm,测量时激光束从超分辨掩膜一

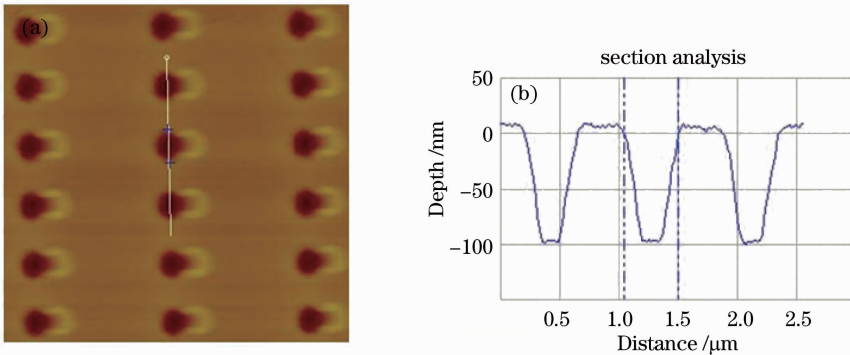


图1 光盘盘基的AFM分析。(a)信息点的AFM图像;(b)信息点的截面分析图

Fig. 1 AFM analysis of optical disk. (a) AFM image of information points; (b) section analysis image of information points

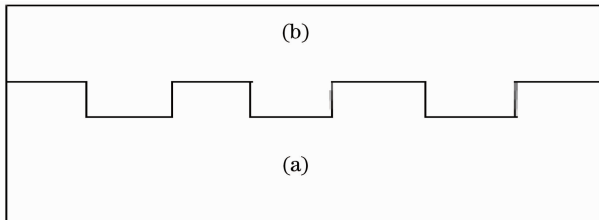


图2 光盘的膜层结构。(a)预刻有390 nm信息点的聚碳酸酯盘基;(b)Si掺杂Ag基复合薄膜

Fig. 2 Film structure of disk. (a) Polycarbonate disk with pre-engraved 390 nm information points; (b) Si-doped Ag composite film

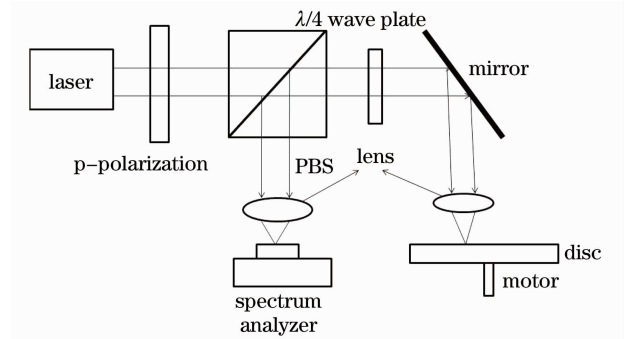


图3 光盘的动态测试装置

Fig. 3 Dynamic test device of optical disk

侧入射进行读出。薄膜中 Si 的摩尔分数采用 Thermo Scientific X 射线光电子能谱分析仪(XPS)测量;用 AURIGA ZEISS 扫描电子显微镜(SEM)观察了复合薄膜微观形貌;用 SOPRA GES-5E 椭圆偏振光谱仪测量了复合薄膜的光学常数和厚度。

### 3 实验结果与分析

图 4 是超分辨光盘读出信号载噪比随 Si 靶溅射功率的变化关系,固定共溅薄膜的厚度为 39 nm 和 Ag 靶的溅射功率为 55 W, Si 靶溅射功率从 85 W 逐渐增加到 105 W,从图 4 中可以看出光盘上 390 nm 的记录点可以被读出,读出信号载噪比开始随着 Si 靶溅射功率增加而增大;当 Si 靶的溅射功率大于 95 W 时,超分辨光盘的读出信号载噪比逐渐

下降, Si 的最佳溅射功率为 95 W, 读出信号为 28 dB, 如图 5 所示。

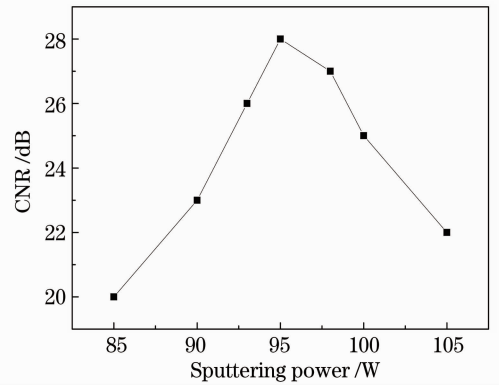


图 4 读出信号载噪比随 Si 的溅射功率的变化曲线

Fig. 4 Dependence of readout signal's carrier-to-noise ratio on the Si sputtering power

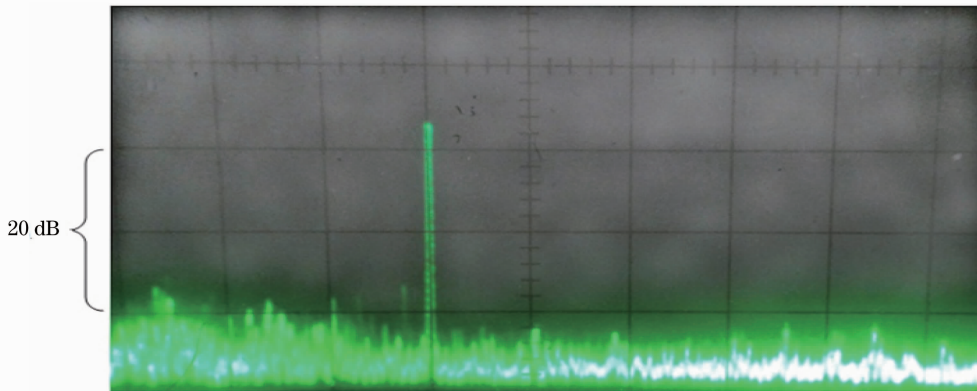


图 5 测试出的超分辨光盘的最佳读出信号

Fig. 5 Tested best readout signal of super-resolution disk

图 6 是超分辨光盘读出信号载噪比随 Ag 靶溅射功率的变化关系,薄膜的厚度固定在 39 nm, Si 靶的溅射功率固定在 95 W, Ag 靶溅射功率从 45 W 逐渐增加到 70 W,从图 6 中可以看出读出信号载噪

比开始随着 Ag 靶溅射功率增加而增大;当 Ag 靶溅射功率大于 55 W 时,超分辨光盘的读出信号载噪比迅速下降;其主要变化趋势与图 4 相似,但变化幅度比图 4 大,说明超分辨光盘的读出性能随 Ag 靶溅射功率的变化显著,这与 Ag 的沉积速率随溅射功率的变化大于 Si 的沉积速率随溅射功率的变化有关, Ag 的最佳溅射功率为 55 W。

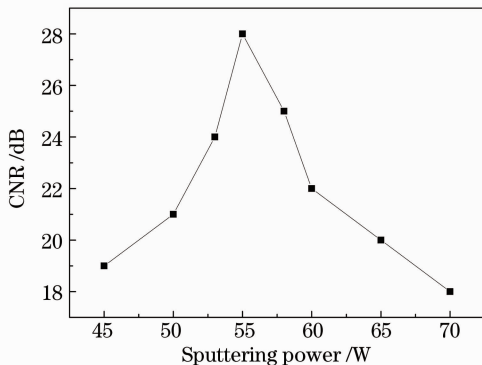


图 6 读出信号载噪比随 Ag 的溅射功率的变化曲线

Fig. 6 Dependence of readout signal's CNR on the Ag sputtering power

图 7 为溅射时间对超分辨光盘读出性能的影响, Si 溅射功率为 95 W, Ag 溅射功率为 55 W, 读出信号载噪比先随共溅时间的增加逐渐增大, 当溅射时间为 80 s 时, 载噪比达到最大值, 然后随溅射时间增加而下降, 最佳的溅射时间为 80 s。因此可以得到超分辨光盘掩膜层制备最佳工艺条件为: Si 溅射功率 95 W, Ag 溅射功率 55 W, 共溅时间 80 s。用椭圆偏振仪测得该最佳工艺条件下的薄膜厚度为 39 nm。图 8 是超分辨光盘的读出信号随读出次数的变化, 从图中可以看出光盘在持续读出 10 万次

后,载噪比只有轻微下降,说明光盘的读出稳定性非常好。

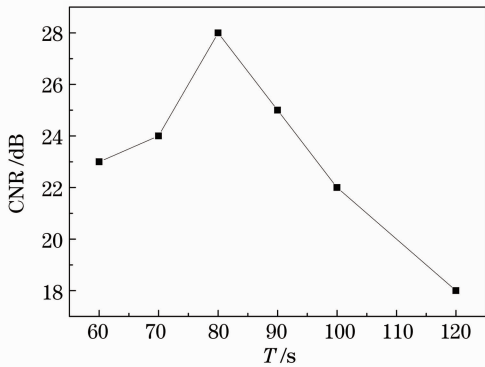


图7 读出信号载噪比随溅射时间  $T$  的变化曲线  
Fig. 7 Dependence of readout signal's CNR on the sputtering time

图9是超分辨掩膜 XPS 分析谱图,经过分析和计算,该复合薄膜中 Si 的摩尔分数为 14.5%;图10是最佳工艺条件下制备的超分辨掩膜微区 SEM 观察图,从图中可以看出 Si 均匀地掺杂到了 Ag 薄膜当中,薄膜表面平整;图11是椭圆偏振光谱仪测得

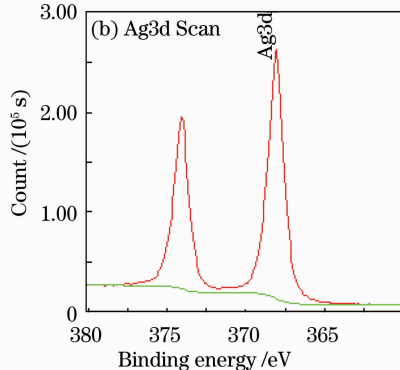
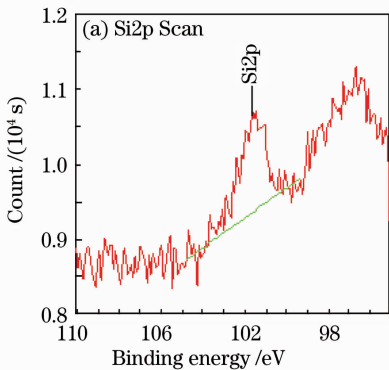


图9 Si 掺杂 Ag 基超分辨复合薄膜的 XPS 分析谱图  
Fig. 9 XPS image of Si-doped Ag super-resolution film

为了验证超分辨掩膜的读出机理,测试了在最佳的工艺条件下只镀一层 Ag 和只镀一层 Si 的超分辨光盘的读出信号,发现只镀 Ag 的光盘读出载噪比为 22 dB,而只镀 Si 的光盘没有读出信号。关于超分辨掩膜层的信号读出机理,不同材料的读出机理也不尽相同<sup>[12]</sup>,研究认为 Si 的读出机理是孔径型 Super-RENS<sup>[13]</sup>,而 Ag 的读出机理是散射型<sup>[11]</sup>。从上面的测试结果上推断该复合薄膜的超分辨效应主要来自于 Ag 的作用,在光盘的读出过程中,一部分入射光可以通过 Ag 表面等离子体耦合而产生倏逝波<sup>[14,15]</sup>,这种倏逝波又会在空气和 Ag 薄膜表面

超分辨掩膜折射率与消光系数随波长的变化关系,从图 11(a)中可以看出复合薄膜的折射率在 350~850 nm 波段呈现出先增大(350~630 nm)后减小(630~850 nm)的趋势,从图 11(b)中可以看出,薄膜的消光系数基本上随着波长的增加而增大,在波长 780 nm 处,薄膜的折射率和消光系数分别为 0.84 和 2.37。

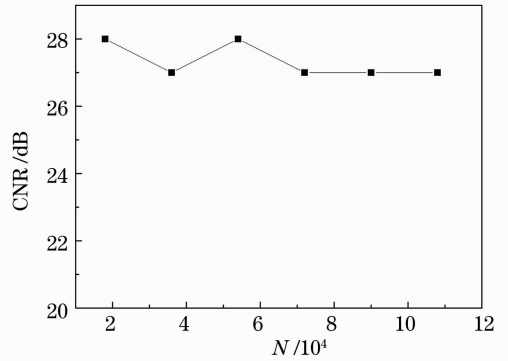


图8 超分辨光盘读出信号随读出次数的变化曲线  
Fig. 8 Dependence of readout signal's CNR on the readout times

激发产生表面等离子体波,这种波在红光波段的波矢  $\mathbf{K}_{sp}$  大约是入射光波矢的 1.03 倍。这种表面等离子体波通过 Ag 薄膜被散射后转化为入射波透过了掩膜层,这种倏逝波和等离子体波包含了许多细微的信息,使得光盘的分辨率要远高于入射光的分辨率,所以低于衍射极限的点可以在光盘上被读出。Si 的加入之所以能够提高超分辨光盘读出信号的载噪比,原因是 Si 提高了 Ag 薄膜表面的等离子体耦合效应,使得薄膜表面产生的等离子体波加强,从而使得透过掩膜层的入射波的强度加强达到了载噪比提高的效果。



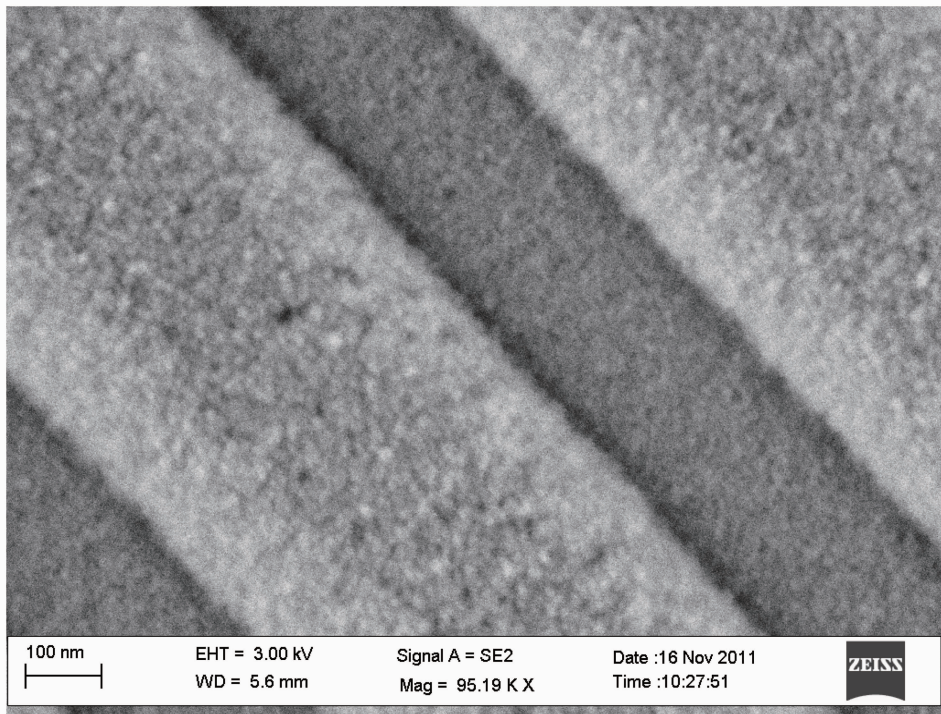


图 10 超分辨复合薄膜的 SEM 图像(Ag 溅射功率率为 55 W, Si 溅射功率率为 95 W,  $T=80$  s)

Fig. 10 SEM image of super-resolution composite film (sputtering power of Ag is 55 W, sputtering power of Si is 95 W,  $T=80$  s)

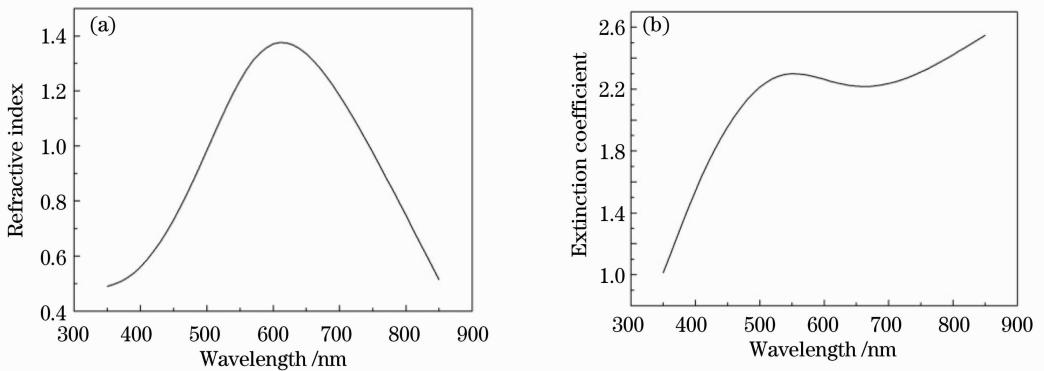


图 11 超分辨复合薄膜的折射率(a)和消光系数(b)随波长的变化曲线

Fig. 11 Dependence of refractive index (a) and extinction coefficient (b) of super-resolution composite film on wavelength

## 4 结 论

采用 Ag 和 Si 共溅的方式制备了超分辨掩膜层材料,通过改变 Ag 和 Si 的溅射功率来控制掩膜层材料中的 Ag 和 Si 的成分,改变溅射时间来控制薄膜的厚度。发现薄膜中 Si 摩尔分数为 14.5%,薄膜厚度为 39 nm 时,其超分辨光盘的读出信号载噪比最高为 28 dB。光盘在持续读出 10 万次以后,读出信号基本不变,读出性能非常稳定。

## 参 考 文 献

- 1 Wei Jinsong, Ruan Hao, Shi Hongren *et al.*. Study on read-only optical disk with Sb mask super-resolution[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(12): 902~904  
魏劲松, 阮昊, 施宏仁等. 基于 Sb 掩膜的只读式超分辨光盘[J]. *科学通报*, 2002, **47**(12): 902~904
- 2 Zhai Fengxiao, Jiang Laixin, Wang Yang *et al.*. Nonlinear optical response of  $Sb_{80}Bi_{20}$  phase change films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1352~1355  
翟凤潇, 姜来新, 王阳等.  $Sb_{80}Bi_{20}$  相变薄膜的非线性光学响应[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1352~1355
- 3 Wei Jingsong, Ruan Hao, Shi Hongren *et al.*. A novel approach to super-resolution pits readout[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 526~528

- 魏劲松, 阮 昊, 施宏仁 等. 一种新的超分辨记录点的读出技术[J]. 光学学报, 2003, **23**(5): 526~528
- 4 K. Yasuda, O. Masumi, A. Katsuhisa *et al.*. Premastered optical disk by super resolution[J]. *Jpn. J. Appl. Phys. B*, 1993, **32**(11): 5210~5213
- 5 J. Wei, F. Gan. Thermal lens model of Sb thin film in super-resolution near-field structure[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(16): 2607~2609
- 6 Feng Zhang, Wengdong Xu, Yang Wang *et al.*. Static recording characteristics of new type super-resolution near-field structure[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10): 611~614
- 7 Hyun Seok Lee, Taek Sung Lee, Yongwoon Lee *et al.*. Microstructural and optical analysis of super resolution phenomena due to  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  thin films at blue light regime[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(22): 221108
- 7 Zhang Kui, Geng Yongyou, Wu Yiqun *et al.*. Dependence of optical properties on thickness of  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1231002  
张 奎, 耿永友, 吴宜群 等. 膜厚对  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  薄膜光学性质的影响[J]. 光学学报, 2011, **31**(12): 1231002
- 8 Yung-Chiu Her, Yuh-Chang Lan, Wer-Chih Hsu *et al.*. Recording and readout mechanisms of super-resolution near-field structure disk with a silver oxide mask layer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(11): 2136~2138
- 9 Jinsong Wei, Yang Wang, Wengdong Xu *et al.*. Readout of super-resolution marks with Ti thin film[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(7): 420~422
- 10 Zhai Fengxiao, Li Simian, Huang Huan *et al.*. Transient optical response of  $\text{Bi}_{20}\text{Sb}_{80}$  films induced by picoseconds laser pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2620~2624  
翟风潇, 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
- 11 Jinsong Wei, Fuxi Gan. Dynamic readout of subdiffraction-limited pit arrays with a silver superlens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(21): 211101
- 12 Wei Jinsong, Ruan Hao, Shi Hongren *et al.*. Read-out of a read-only super-resolution optical disc with a si mark[J]. *Chinese Phys.*, 2002, **11**(10): 1073~1075
- 13 Chen Wenzhong, Wu Yiqun, Wang Yang *et al.*. Super-resolution near-field structure and its research progress of recording and readout mechanisms[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(12): 36~44  
陈文忠, 吴宜群, 王 阳 等. 超分辨近场功能薄膜的膜层结构及其机理研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(12): 36~44
- 14 R. B. Nielsen, M. D. Thoreson, W. Chen *et al.*. Toward superlensing with metal-dielectric composites and multilayers[J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **100**(1): 93~100
- 15 N. Fang, H. Lee, C. Sun *et al.*. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science*, 2005, **308**(5721): 534~537

栏目编辑: 韩 峰