

In 掩膜层超分辨光盘的读出研究

张奎 耿永友 施宏仁

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 在超分辨光存储技术中,掩膜层材料是决定其性能优劣的关键。In 薄膜可以作为掩膜层用来实现超分辨信息点的动态读出。采用直流磁控溅射法制备不同厚度的 In 薄膜,用台阶仪测量薄膜厚度随时间的变化关系,用原子力显微镜观察不同厚度薄膜样品的表面形貌。在预刻有尺寸为 390 nm 信息点的光盘盘基上制备 In 薄膜,从而形成 In 掩膜超分辨光盘。利用光盘动态测试仪进行动态读出,最高读出载噪比(CNR)达到 26 dB。为了进一步分析超分辨动态读出的物理机理,采用变温椭圆偏振光谱仪测量 In 薄膜在不同温度下的光学常数,得到 In 薄膜在不同温度下的反射率和吸收系数。分析表明 In 掩膜超分辨光盘的读出机理符合孔径型超分辨读出模型。

关键词 薄膜;超分辨;In 掩膜;载噪比

中图分类号 TQ591 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0607002

Study on Super-Resolution Readout with Indium Thin Film as Mask Layer

Zhang Kui Geng Yongyou Shi Hongren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The key performance of super-resolution optical disk storage technique is mainly determined by the mask material. In this work, the super resolution pits on the optical disk are dynamically read out with indium thin film as a functional mask layer. Thin films with different thicknesses are deposited by direct current magnetron sputtering method, the thickness changes with time of the In thin films are measured by profilometer and the different surface morphologies are observed by atomic force microscopy. In thin film in the pre-engraved super-resolution optical disk with pit size of 390 nm is created to form the In mask super-resolution optical disk. The readout is tested by the optical disk dynamic tester, and the largest carrier to noise ratio (CNR) of 26 dB is obtained. To explore the internal mechanism of this super-resolution readout ability, the optical constant under different temperatures is studied by variable temperature ellipsometer. The reflectivity and absorption coefficient are also obtained. The experimental results indicate that the mechanism of the super-resolution readout with In thin film as mask can be explained by the model of aperture-type super-resolution.

Key words thin films; super-resolution; In mask layer; carrier to noise ratio

OCIS codes 310.6860; 210.4245; 190.4870

1 引言

在信息社会飞速发展的今天,人们对超高密度信息存储技术的要求越来越高。传统的光盘存储技术,由于光学衍射极限的限制,存储密度的提高受到很大的制约。对此,J. Tominaga 等^[1]提出了超分辨近场结构光存储技术(Super-RENS),它是一种基于功能薄膜结构的超分辨技术,在不改变读出系统光路的前提下实现超越衍射极限的读写效果,具有良

好的系统兼容性。在该技术中,功能薄膜结构材料(也称之为掩膜材料)是决定其性能的关键^[2]。之前诸多的掩膜材料如有机染料^[3,4]、金属氧化物^[5]、Sb、AgInSbTe、SiSb、Si 等材料^[6~11]用于超分辨光盘的读出取得了较好的实验结果,但由于这些传统的掩膜材料熔点太高,会影响超分辨光盘的使用寿命,且较高的读出功率会引起光盘的热变形和记录点的损坏,因此选择具有较低熔点的掩膜材料十分

收稿日期: 2012-02-09; 收到修改稿日期: 2012-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(61137002)和中国科学院院地合作项目资助课题。

作者简介: 张奎(1983—),男,助理工程师,主要从事薄膜工艺、性能等方面的研究。E-mail: zkui1939@163.com

必要^[12]。

In 具有较低的熔点(156.61 ℃)和较好的稳定性,适合用作掩膜材料。本文采用 In 薄膜作为掩膜层,研究了超分辨光盘的读出性质,采用变温椭圆偏振光谱仪测量了 In 薄膜的光学常数,得到了 In 薄膜在不同温度下的反射率和吸收系数。根据其光学性能随温度的变化规律,对 In 掩膜超分辨光盘的读出机理进行了分析和讨论。

2 实 验

采用直流磁控溅射法在预刻有直径 390 nm、深度 50 nm 的信息点的光盘盘基上制备不同厚度的 In 薄膜。所用的光盘盘基为直径 120 mm、厚度 1.2 mm 的聚碳酸酯基片。磁控溅射的本底真空度低于 2×10^{-4} Pa,溅射气体为高纯氩气,氩气流量控制为 80 sccm(1 sccm 表示标准状态下 1 mL/min),溅射气压控制为 0.8 Pa,In 靶的溅射功率为 40 W。

利用 KLA-Tencor D-100 型台阶仪(精度为 0.1 nm)测定 In 薄膜厚度,实验中薄膜的厚度控制在 24 ~ 77 nm。利用原子力显微镜(AFM, Multimode V, Veeco)观察不同厚度 In 薄膜的表面形貌。In 掩膜超分辨光盘的读出信号利用光盘动态测试仪测得,其读出激光波长为 780 nm,数值孔径(NA)为 0.4,读出功率为 1.5 mW。利用 GES5E 型变温椭圆偏振光谱仪测量 In 薄膜在不同温度下的光学常数,测量光谱范围为 400~830 nm,光源入射角取 70°。

3 实验结果和讨论

图 1 是溅射功率为 40 W 时 In 薄膜厚度与溅射时间的关系曲线。为尽可能准确地得到膜厚与时间的关系,在溅射时间相同的条件下分别制备三个样

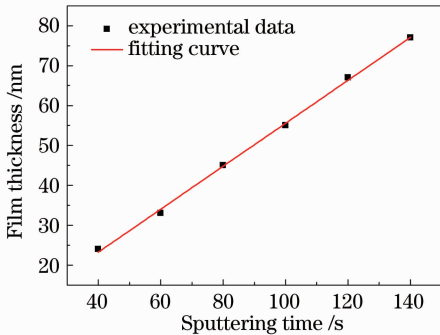


图 1 In 薄膜厚度与溅射时间的关系

Fig.1 Dependence of the thickness of In films on the sputtering time

品,测得每个样品的厚度取其平均值作为膜厚。从图中可以看出:薄膜厚度随着溅射时间的增加呈线性增长趋势,通过该直线的斜率可以得到 In 薄膜的溅射速率为 0.54 nm/s。

掩膜层表面质量对于超分辨光盘的读出信号具有非常重要的影响。采用原子力显微镜对沉积在 K9 基片上的 In 薄膜表面形貌进行分析测试,图 2 给出了厚度为 45 nm 的沉积态 In 薄膜的表面形貌图,扫描区域为 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 。由图可知,In 薄膜样品的表面平整,没有较大的颗粒和凸起出现。对不同厚度的 In 薄膜的表面粗糙度进行测试比较,图 3 给出了表面粗糙度随膜厚的变化关系。从图 3 可以看出不同厚度的 In 薄膜的表面粗糙度均低于 3.9 nm,表明制备的 In 薄膜都具有较好的表面质量,基本满足超分辨光盘的读出需要。

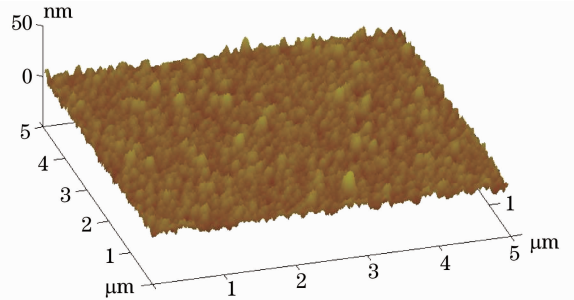


图 2 沉积态 In 薄膜的 AFM 形貌图

Fig.2 AFM image of the as-deposited In film

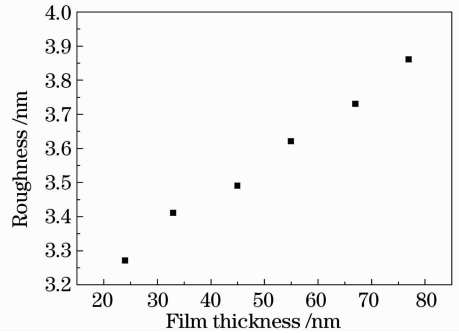


图 3 In 薄膜表面粗糙度随厚度的变化

Fig.3 Dependence of the surface roughness on the thickness of In film

采用实验室搭建的光盘动态测试仪来进行超分辨光盘的读出性能测试。实验所用测试仪的读出激光波长(λ)为 780 nm,NA 为 0.4(测试精度: ± 1 dB)。一般来说,读出光斑直径可以根据公式 $D=1.22\lambda/NA$ 来计算,即为 2379 nm,而其光学分辨率为 $D/4$ ^[13],约为 594 nm,这个尺寸大于记录点直径(390 nm),因此在没有沉积 In 掩膜层的情况下,利用该光盘动态测试仪无法读出预刻在盘基上

的信息点。但是通过沉积一层 In 掩膜层,利用掩膜层缩小光斑即可对信息点进行读出。图 4 给出了采用 In 掩膜实现超分辨信息点动态读出的实验结果,在该实验中 In 薄膜厚度为 45 nm。图 4(a)为动态

读出的频谱仪信号,表明读出载噪比(CNR)达到 26 dB。图 4(b)给出相应的示波器信号,从中可以看出示波器信号被周期性信息点有规律地调制,而且调制信号清楚稳定。

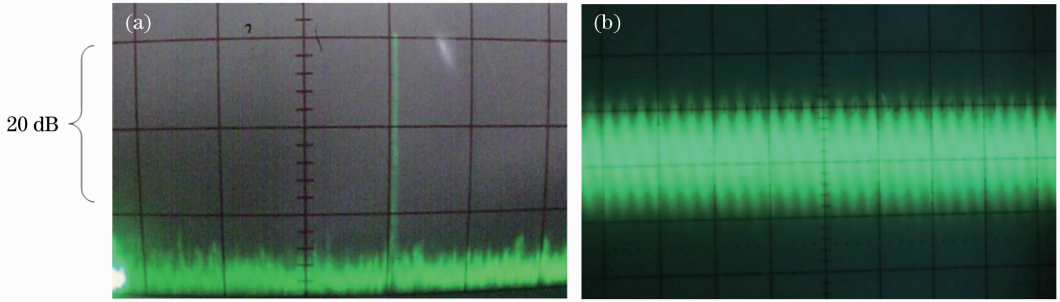


图 4 (a)超分辨光盘的最佳读出信号频谱图和(b)示波器信号图

Fig. 4 Readout signal of super-resolution disk (a) and oscilloscope signal (b)

为了进一步研究 In 掩膜层超分辨光盘的读出机理,采用变温椭圆偏振光谱仪对 45 nm 厚的 In 薄膜的光学常数进行测量,温度分别设置为 17 °C、60 °C、70 °C、80 °C、90 °C、100 °C、110 °C、120 °C、130 °C、140 °C、150 °C(温度控制精度:±0.1 °C)。测试分析结果如图 5 所示,其中图 5(a)为 In 薄膜的折射率 n 与温度的变化关系,而图 5(b)为 In 薄膜

在温度升高过程中消光系数 k 随温度的变化关系曲线。从图中可以看出在波长为 780 nm,当温度低于 120 °C 时,折射率和消光系数随温度的升高略有减小。当温度高于 120 °C 时,折射率和消光系数随温度的升高急剧下降。这表明了 In 薄膜的光学常数在 120 °C 时存在一个温度变化阈值。

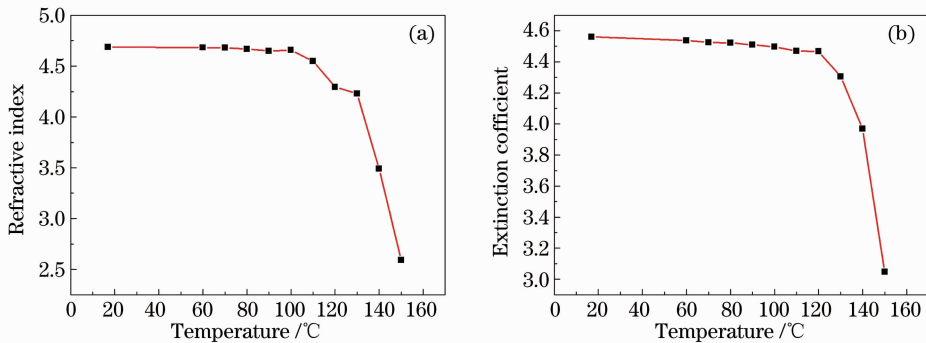


图 5 In 薄膜的(a)折射率和(b)消光系数在 780 nm 处随温度的变化曲线

Fig. 5 Dependence of refractive index (a) and extinction coefficient (b) of In film on the annealing temperature at the wavelength of 780 nm

一般来说,在光盘信息点的动态读出中可以直接探测反射率的变化,而反射率的变化又与折射率 n 、消光系数 k 和吸收系数 α 有关。反射率和吸收系数可以表示为

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}. \quad (2)$$

将图 5 的数据代入(1)式和(2)式能够获得 In 薄膜在温度升高过程中反射率 R 和吸收系数 α 的变化关系曲线,如图 6(a)、(b)所示。

由该曲线可知,In 薄膜的反射率和吸收系数均

随温度的升高而呈下降趋势,在 120 °C 出现一个拐点,即在 120 °C 之前变化缓慢,温度高于 120 °C 后急剧下降,表明在 120 °C 时薄膜发生了由固态向熔融态转化。In 薄膜在熔融态的反射率低于固态。

在传统的读出方式中,如果读出光斑中出现两个或两个以上的信息点,其记录信号无法读出,如图 7(a)所示。而在 In 掩膜超分辨光盘中,激光束经透镜聚焦在 In 掩膜层上,由于聚焦光斑的能量的高斯分布和光盘的转动,光斑的后半部区域温度大于前半部,当温度超过 In 掩膜的熔化温度时,掩膜层从固态转变为熔融态,而前半部区域仍为固态,如

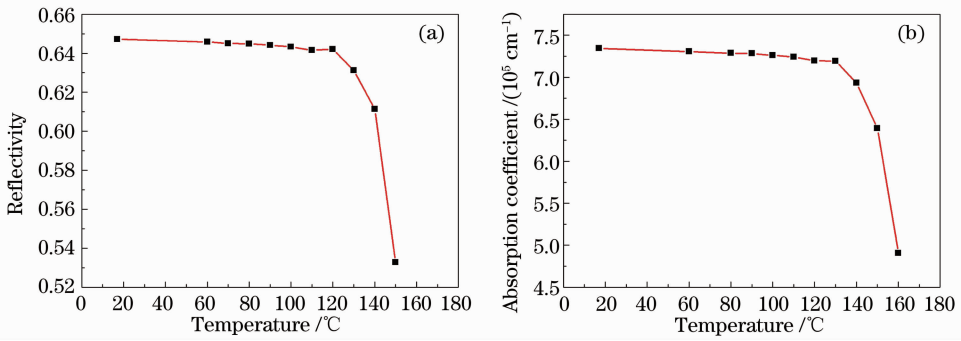


图 6 In 薄膜的(a)反射率和(b)吸收系数在 780 nm 处随温度的变化曲线

Fig. 6 Dependence of reflectivity (a) and absorption coefficient (b) of In film on the annealing temperature at the wavelength of 780 nm

图 7(c)所示。根据图 6 中不同温度下 In 薄膜的反射率 R 和吸收系数 α 的分析,熔融态时反射率 R 和吸收系数 α 均比固态时要低,这样在光斑的后半部(即椭圆形区域)透射率高于前半部分,就形成了“开孔”效应,如图 7(b)所示,从而导致光斑后半部透过 In 薄膜,而前半部反射到接收器,因此光斑有效减小,达到超分辨效果。

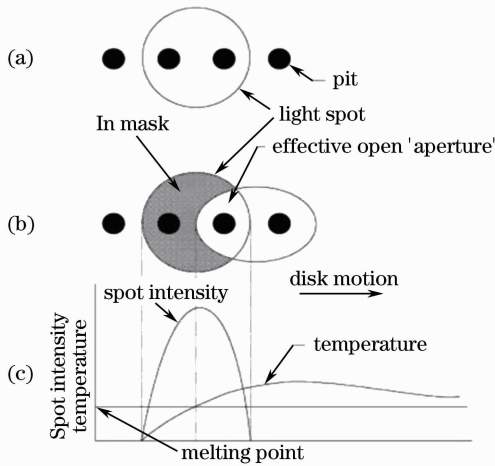


图 7 超分辨光盘读出机理。(a)传统光盘读出;(b)超分辨光盘读出;(c)温度与读出激光能量分布

Fig. 7 Readout principle of super-resolution disk. (a) Conventional disk readout; (b) super-resolution disk readout; (c) temperature and laser beam energy distribution

在实验中发现光盘的读出载噪比与掩膜层的厚度也密切相关。图 8 给出了 In 掩膜超分辨光盘读出载噪比与薄膜厚度变化的关系。从图中可以看出,在 1.5 mW 的读出功率下,当 In 掩膜层的厚度在 24~77 nm 的范围内变化时,盘基上的信息点均可读出。读出载噪比先随着掩膜层厚度的增加而增大,这主要是因为读出激光的作用下,薄膜厚度较小的 In 掩膜层开孔过大,固态区与熔融区之间反射

率对比度不高,因此超分辨光盘的读出载噪比也比较低;随着膜厚的增大,In 掩膜层的开孔慢慢减小,固态区和熔融区的反射率对比度随之升高,光盘的读出载噪比也随之增加。当掩膜层厚度为 45 nm 时达到最大值 26 dB。当 In 掩膜层厚度大于 45 nm 时,读出载噪比随掩膜层厚度增加而逐渐下降。这可能是由于膜厚继续增加时,In 掩膜层开孔反而过小,固态区与熔融区反射率对比度随之降低,从而导致读出载噪比下降。因此,在超分辨光盘的膜层设计中,掩膜层的厚度必须要事先经过模拟、设计、优化才能在随后的应用中达到最佳效果。

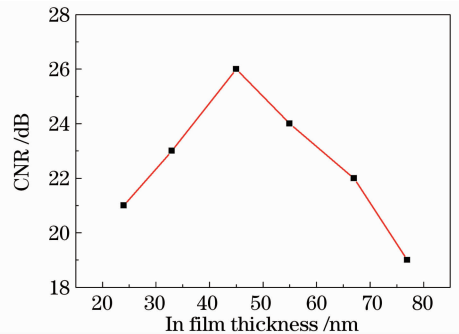


图 8 读出信号载噪比随 In 薄膜厚度的变化曲线

Fig. 8 Dependence of CNR on In film thickness

对于光存储技术,随着短波长激光二极管(405 nm波长的 GaN 蓝光激光器)的研制成功,随即步入了短波长的存储时代。目前新一代蓝光光盘已成为第三代光存储的主流技术,因此实验中也测试分析了 In 掩膜材料在波长为 405 nm 时的反射率和吸收系数随温度的变化关系,如图 9(a)、(b)所示。从图中可以看出,In 薄膜在 405 nm 波长的反射率和吸收系数随温度的变化趋势与 780 nm 波长相似,从中可以推断 In 薄膜在蓝光读出系统中也可以实现读出光斑缩小,有望应用于蓝光超分辨光盘中。

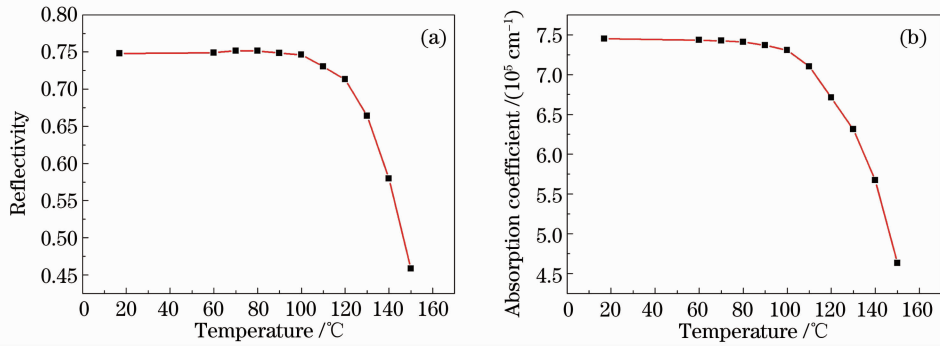


图9 In 薄膜的(a)反射率和(b)吸收系数在 405 nm 处随温度的变化曲线

Fig. 9 Dependence of reflectivity (a) and absorption coefficient (b) of In film on the annealing temperature at the wavelength of 405 nm

4 结 论

采用 In 薄膜作为掩膜层制备了超分辨光盘,实现了超分辨信息点的动态读出。结果表明当 In 薄膜厚度为 45 nm,读出功率为 1.5 mW 时,超分辨光盘的读出载噪比达到最高值 26 dB。变温椭圆偏测试结果表明 In 薄膜在波长 780 nm 处的光学常数以及反射率、吸收系数均随着温度的升高有减小的趋势,结果证明 In 薄膜可作为一种功能掩膜材料应用于超分辨光盘中。变温椭圆偏测试结果证实了 In 掩膜超分辨光盘的读出机理可以用孔径型超分辨读出模型来解释。通过比较分析 In 薄膜在 405 nm 与 780 nm 波长下的反射率和吸收系数随温度变化的规律,可以初步推断 In 掩膜有望应用于蓝光超分辨光盘中。

致谢 感谢逯鑫森博士、李豪博士在实验中的大力帮助。

参 考 文 献

- 1 J. Tominaga, T. Nakano, N. Atoda. An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(15): 2078~2080
- 2 Qu Qingling, Wang Yang, Gan Fuxi. Working mechanism of the binary eutectic alloy mask layer in super-resolution near-field structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 530~533
瞿青玲, 王 阳, 干福熹. 超分辨近场结构中二元共晶合金掩膜的工作机制[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 530~533
- 3 K. Yasuda, M. Ono, K. Aratani *et al.*. Premastered optical disk by super-resolution[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, **32**: 5210~5213
- 4 Wei Bin, Wu Yiqun, Gu Donghong *et al.*. Optical parameters

- and absorption of AZO dye and its metal-substituted compound thin films[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20**(9): 1600~1602
- 5 Wang Pei, Lu Yonghua, Tang Lin *et al.*. Investigation on nonlinear optical properties of AgO_x-Type super-resolution near-field structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 188~191
王 沛, 鲁拥华, 唐 麟等. AgO_x 型超分辨近场结构的非线性光学特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 188~191
 - 6 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
 - 7 F. Zhang, Y. Wang, W. D. Xu *et al.*. High-density read-only memory disk with Ag₁₁In₁₂Sb₅₁Te₂₆ super-resolution mask layer[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(10): 1973~1975
 - 8 Huang Huan, Wang Yang, Gan Fuxi. Laser initialization study of novel SiSb phase change films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1135~1139
黄 欢, 王 阳, 干福熹. SiSb 相变薄膜的激光初始化研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1135~1139
 - 9 Zhang Kui, Geng Yongyou, Wu Yiqun *et al.*. Dependence of optical properties on thickness of Sb₂Te₃ film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1231002
张 奎, 耿永友, 吴宜群等. 膜厚对 Sb₂Te₃ 薄膜光学性质的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1231002
 - 10 Wei Jinsong, Ruan Hao, Shi Hongren *et al.*. Read-out of a read-only super-resolution optical disc with a si mark[J]. *Chinese Physics*, 2002, **11**(10): 1073~1075
 - 11 Zhai Fengxiao, Li Simian, Huang Huan *et al.*. Transient optical response of Bi₂₀Sb₈₀ films induced by picoseconds laser pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2620~2624
翟风潇, 李思勉, 黄 欢等. Bi₂₀Sb₈₀ 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
 - 12 Li Jinyan, Gan Fuxi. Application of super-resolution technology in optical disks[J]. *Physics*, 2002, **31**(1): 22~26
李进延, 干福熹. 超分辨技术在光盘中的应用研究[J]. *物理*, 2002, **31**(1): 22~26
 - 13 T. Kikukawa, T. Kato, H. Shingai *et al.*. High-density read-only memory disc with super-resolution reflective layer[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(3B): 1624~1628