

超分辨近场结构光盘的传统以及差分读出方法研究

胡文华 常胜利 杨建坤 李修建* 谭吉春

(国防科学技术大学理学院技术物理研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要 利用标量衍射理论和角谱方法, 针对超分辨近场结构光盘存储系统建立了简单物理模型, 并提出了超分辨近场结构光盘的读出信号仿真计算方法。通过对比实际测试信号与模拟信号, 证明了该读出信号计算方法的可行性。此外, 针对超分辨掩膜层对不同功率入射激光响应不同的特性, 分别分析了单轨道和三轨道记录符在高、低功率两束激光读出下的差分信号。数值模拟发现, 与传统读出信号相比, 差分读出方法能够减小来自邻道的串扰, 而且利用差分读出方法获得的信号质量更高。

关键词 光数据存储; 差分读出方法; 标量衍射理论; 读出信号

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0621001

Traditional and Differential Readout Technology for Super-Resolution Near-Field Structure Disc

Hu Wenhua Chang Shengli Yang Jiankun Li Xiujian Tan Jichun

(Tech-Physical Research Center, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Based on the established simple model of an optical system, the traditional readout signal of super-resolution near-field structure (Super-RENS) disc is simulated according to scalar diffraction theory and angular spectrum method. By comparing simulation results with experimental signals, the validity of the calculation method is proved. Moreover, the differential signal, which is the difference of signals read out by high and low power incident laser, is simulated for single track and three tracks recording pattern. It is shown that, by using the differential readout method, the cross talk from adjacent pits is decreased and high quality readout signal can be obtained.

Key words optical data storage; differential readout technology; scalar diffraction theory; readout signal

OCIS codes 210.4590; 210.4770

1 引言

人类已经进入飞速发展的信息化时代, 高密度数据存储技术一直是信息和计算机技术发展的动力和方向。以光盘为代表的光存储技术经过几十年的发展, 以其存储寿命长、信噪比高和信息位价格低等特点, 在多媒体存储、资料库等应用领域中占有主导地位。迄今为止, CD, DVD 和蓝光光盘技术的发展已趋成熟。但是, 传统光盘存储的记录密度始终受限于瑞

利衍射极限。为了摆脱衍射极限的限制, 相继提出了固体浸没透镜、探针近场记录这两种近场光存储技术^[1,2]。对于固体浸没透镜技术来讲, 光学头的加工制作比较困难, 而且光学头与记录盘片间的近场距离难以控制。探针近场记录技术也存在类似的问题, 那就是探针的飞行高度不易控制, 高速旋转的盘片容易损坏探针。为了克服上述近场存储技术的不足, 1998 年, Tominaga 提出了超分辨近场结构 (Super-RENS)

收稿日期: 2010-12-29; **收到修改稿日期:** 2011-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(60907003, 61070040)和国防科学技术大学校预研基金(JC09-02-12)资助课题。

作者简介: 胡文华(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事光计算和光存储等方面的研究。

E-mail: wenhua_hu3000@gmail.com

导师简介: 谭吉春(1946—), 男, 教授, 主要从事光学信息的传输与处理等方面的研究。E-mail: nudt2004@126.com

* **通信联系人。** E-mail: xjli@nudt.edu.cn

光盘^[3],该光盘在传统光盘结构的基础上添加了一层 Sb 薄膜作为超分辨掩膜层(super resolution mask layer),在入射激光波长为 686 nm 和数值孔径为 0.6 的光学系统中获得了 90 nm 的记录符。

迄今为止,超分辨近场结构光盘的研究主要包括工作机理研究以及新结构、新材料的探索,另外围绕掩膜材料的热稳定性、信号读出的可重复性、信号的载噪比等进行了不少的研究^[4~8]。为了使超分辨近场结构光盘能够走向实用化,高质量的读出信号成为了亟待解决的关键问题之一。本文从理论上模拟了超分辨近场结构光盘在高、低功率激光入射下的读出信号,并进一步研究了二者的差分信号,发现利用差分读出能够获得更高质量的信号,为超分辨近场结构光盘的读出系统设计提供了一条可行的路线。

2 模型的建立

2.1 掩膜层的透射率函数

自从超分辨率结构提出以来,陆续出现了以不同材料作为掩膜层的超分辨率近场结构光盘,包括相变材料、半导体材料以及金属氧化物^[9~11]。掩膜层是实现超分辨存储的关键,目前针对不同材料的工作机理研究尚无定论,等离子体效应、光热引起的相变、金属纳米颗粒的散射和微小椭圆气泡等都是可能的原因^[13~16],公认的一点是掩膜层对入射光的非线性作用^[17,18]。以相变材料组成的超分辨掩膜为例,在一定功率激光的照射下,位于能量较高的光斑中心区域的掩膜瞬间熔化,从而形成“透射率小孔”,这样在靠近掩膜的记录层上的光斑急剧缩小。当入射激光功率较小时,掩膜层不发生物理变化(不熔化)。根据文献^[19~21]的实验测量数据和理论分析,假设当入射激光功率超过一定阈值时,掩膜层在光照情况下的透射率函数与光强有如下非线性关系:

$$T(u, v) = T\{I(u, v)\} = T_1 + \frac{T_h - T_1}{1 + \exp\{-a[I(u, v) - b]\}}, \quad a > 0, b \in (0, 1) \quad (1)$$

当入射激光功率较小没有超过这一阈值时,透射率函数为

$$T(u, v) = T_1, \quad (2)$$

式中 $I(x, y)$ 为归一化光强分布函数, T_h, T_1 分别代表透射率的极大值和极小值。 a 表征透射率随光强增大的速度,当光强降到最大值的 b 倍时,透射率为 $(T_h + T_1)/2$,参数 b 描述了透射率与光强二者在空

间上的关系,图 1 给出了几种情况下透射率函数的曲线。

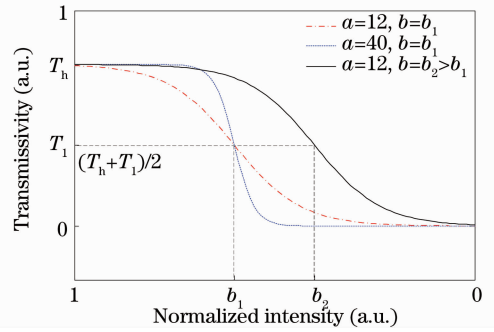


图 1 几种透射率函数曲线

Fig. 1 Curves of several transmittance functions

2.2 读出信号的计算

标量衍射理论是传统光盘衍射分析的经典理论^[22],这里依然用它来分析超分辨近场结构光盘。Super-RENS 光盘读出系统的结构如下图 2(a) 所示,读出激光光束被透镜聚焦后入射到光盘内部,当光束到达超分辨(SR)掩膜层的时候,发生光热反应引起超分辨掩膜层的物理变化,由于它对光束的非线性响应,经过掩膜层后光束变小并入射在包含记录数据符的记录层上。经记录符衍射后,反向传播的衍射波再次经掩膜层调制、最终被透镜会聚并被探测器接收成为最终的读出信号。在以上过程中,超分辨掩膜发挥了关键的作用,为此建立了如图 2(b) 所示的模型,重点考虑超分辨掩膜对读出信号的影响。记录层位于掩膜层的近场,掩膜层与记录层之间的光场的传播必须考虑倏逝波的影响。假设光束经过掩膜层后的复振幅分布为 $F_2(u, v)$,相距 z 的记录层表面的复振幅分布 $P(u', v')$ 可以利用角谱方法来计算,计算方法如下:

$$P(u', v') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(p, q) \exp(jkz \sqrt{1 - p^2 - q^2}) \times \exp[ik(pu' + qv')] dpdq, \quad (3)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数,

$$A(p, q) = \left(\frac{k}{2\pi}\right)^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F_2(u, v) \times \exp[-ik(pu + qv)] dudv. \quad (4)$$

当 $p^2 + q^2 > 1$ 时,角谱传播因子是一个指数衰减函数,这些角谱分量对应于倏逝波。最终读出信号 S 的计算步骤如图 2(c) 所示, \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别代表傅里叶变换和傅里叶逆变换, f_{NP} 表示上述近场的计算过程。 $T(u, v), R(u', v')$ 分别描述超分辨掩膜层和记录层对入射光场的作用。

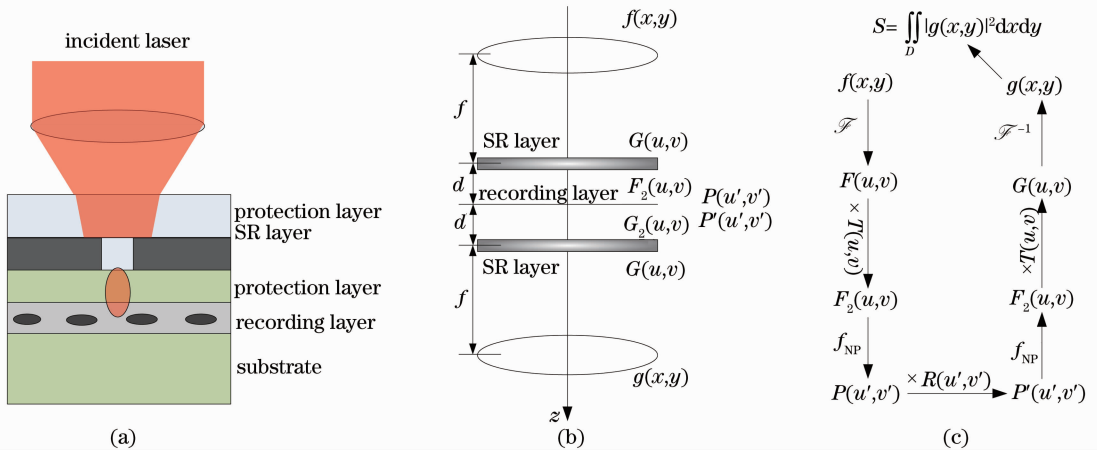


图 2 (a) Super-RENS 光盘存储系统示意图, (b) 简化模型, (c) 读出信号的计算步骤

Fig. 2 (a) Schematic of super-RENS system and (b) its simple model, (c) calculation procedure of readout signal

3 超分辨率近场结构光盘的传统读出信号模拟

2008 年, Olivier 测试了一种超分辨率近场结构只读 (ROM) 光盘的读出信号^[23], 该光盘最小信息

符长宽均为 80 nm, 轨道间距为 280 nm, 在 DVD 系统中采用大功率 (1.5 mW) 和小功率 (0.7 mW) 激光光束读出时得到的信号分别如图 3 所示。

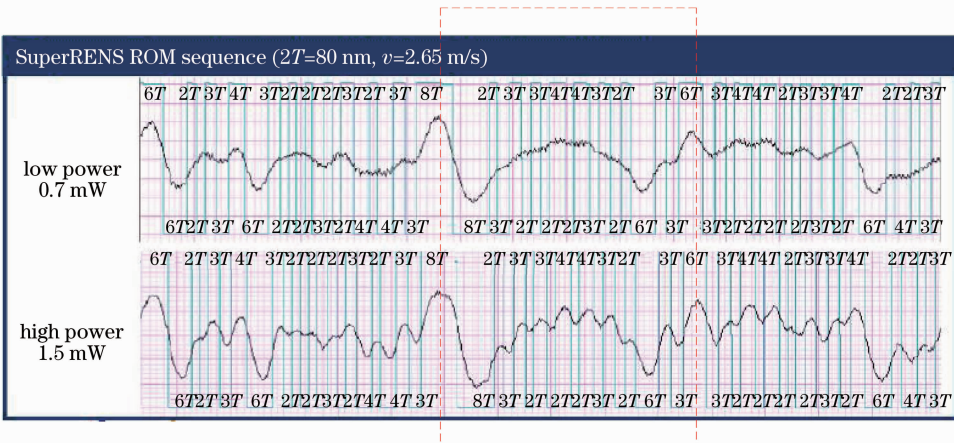


图 3 Super-RENS 只读光盘实际测试信号

Fig. 3 Tested readout signal of super-RENS ROM disc

为了验证超分辨率近场结构光盘读出信号计算的有效性, 任意选取图 3 中虚线框中的记录符样本为对象并对照模拟了在高、低功率激光光束读出下的读出信号。图 4(a) 为数值模拟所用的单轨道记录符样本, 在这里信息坑的形状被简化为矩形, 长、宽与实际样本一样均为 80 nm, 深度为 $\lambda/6$ 。光学系统的参数即为典型 DVD 系统参数, 即波长为 650 nm, 数值孔径为 0.6。高功率和低功率激光读出下掩膜层的透射率函数分别采用 (1) 式和 (2) 式, 其中参数 T_h, T_l, a, b 分别为 0.8, 0.4, 40 和 0.9。按照上述方法编程计算得到读出信号如图 4(b) 所示。

将读出模拟信号与读出测试信号进行比较, 可

以发现, 模拟的读出信号和实际测试得到的信号几乎一致。在低功率激光读出时, 小尺寸记录坑的信息都被淹没, 类似于普通结构只读光盘的读出信号, 小尺寸记录坑的实际测试信号也无法观察到明显的波动。而在高功率激光读出时, 读出信号在所有记录坑的位置都有明显的波动, 这也和实际测试信号相似。究其原因, 在于高、低功率激光入射下超分辨掩膜层对光的响应不同。比较以上结果可以发现, 模拟信号和实测信号符合比较好, 这也说明了简化模型能够模拟实际光盘系统的读出信号, 读出信号的计算方法是有效可行的。值得注意的是, 以上模

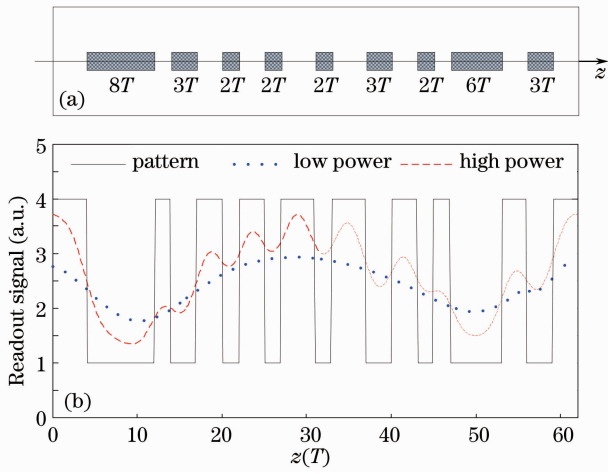


图 4 Super-RENS 只读光盘(a)单轨道记录符样本及其(b)模拟读出信号

Fig. 4 (a) Single track recording pattern and its

(b) simulated readout signals of Super-RENS ROM disc

拟过程中选取的透射率函数近似于圆孔函数,随着孔径的增大,读出模拟信号质量会随之变差。

4 差分读出方法及信号模拟

仔细观察高、低功率激光光束读出下的测试信号,可以清楚的发现,两种情况下读出信号的轮廓是相似的,只是高功率激光读出时,能够观测到较小记录符的信号波动。差分读出方法是将高、低功率激光光束读出下的信号之差作为光盘的最终读出信号,有望提高信号的质量。这里的高功率指的是能够使超分辨掩膜层产生非线性光学效应的激光功率,是相对于不能产生非线性光学效应的较低功率而言的。在实际的光存储系统中,高功率不能太高,避免对记录符造成干扰。仍然以前述记录符样本为对象,模拟得到的差分读出信号如图 5 所示。

定义读出信号中最小信息符的信号振幅的峰峰值 S_{\min} , 读出信号中最大信息符信号振幅的峰峰值

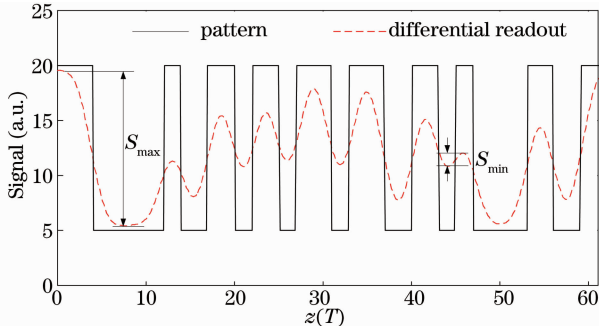


图 5 单轨道记录符样本差分读出信号示意图

Fig. 5 Differential readout signal of single track recording pattern

S_{\max} , $P=S_{\min}/S_{\max}$ 则表征高频调制幅值与低频调制幅值之比。参量 P 描述了任意光盘记录符模式的读出信号的质量,可以视之为读出信号的对比度, P 越大则最小信息符的信号波动越明显,读出信号的质量越高。差分读出和普通读出这两种情况下, P 分别为 0.086 和 0.009,显然差分读出下的信号质量更好。这一点也可以从图 4 和图 5 的读出信号曲线中可以看出,相比较而言,最小信息符的差分读出信号的波动更为明显。

差分读出信号对比度更高的原因可能是来自邻近记录符干扰得到了减小。在高、低功率激光读出下到达记录层表面的光能量分布不一样,后一种情况光斑更为弥散,高功率激光读出时由于超分辨掩膜层的作用光斑能量较为集中。在这两种读出时都存在着来自同轨道临近记录符的信号干扰,经过差分读后来自临近记录符的干扰信号会部分抵消,从而提高了读出信号质量。同样,来自邻道的信号干扰也会影响普通读出时信号的质量。考虑如图 6(a) 所示的三轨道记录符模式,其中间轨道的记录符与前面单轨道相同,在相距 160 nm 的邻道上均匀分布大小为 3T 的记录符。当读出光斑在中间轨道上扫描时,普通读出和差分读出下的信号如图 6(b) 所示。与单轨道时的读出信号相比,三轨道信号的读出质量明显变差,特别是图中虚线圈部分,其主要原因就是来自邻道的串扰。另外,差分读出信号又比普通读出信号有了明显的改善,这说明道间串扰得到了较好的抑制。以上数值分析表明,差分读出方法能够较好地减小串扰的影响,提高读出信号的质量。

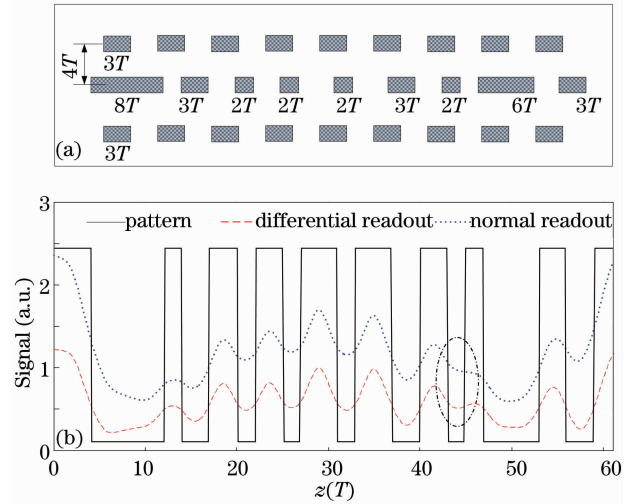


图 6 (a)三轨道记录符样本及其(b)读出信号示意图

Fig. 6 (a) Three track recording pattern and (b) its readout signals

采用差分读出方法可以有效改善光盘的读出性能,但是采用高低功率两束激光作为信号读出光源不可避免地增加了系统的复杂性,所以如何设计一套结构简单的差分读出系统成为提高该方法实用性的关键。差分读出系统可以采取双光束或者将入射光束分成两束功率不等的光束同步聚焦于同一轨道上的思想,利用半导体激光器阵列或者分束器件来实现。

5 结 论

本文针对超分辨近场结构光盘建立了简单的物理模型,并根据标量衍射理论模拟了该光盘系统的信号读出过程,获得了与实际测试信号相近的模拟读出信号。考虑到超分辨掩膜的光响应特性以及高、低功率激光读出信号的曲线性质,将高、低功率激光的读出信号之差作为最终信号。该差分读取方法可以和现有信号读出系统通用,所需要的仅仅是用两束适当功率激光作为信号读出光源。进一步的信号模拟和分析表明,差分读取方法能够减小串扰、获得更高质量的读出信号。

参 考 文 献

- 1 B. D. Terris, H. J. Mamin, D. Rugar *et al.*. Near-field optical data storage using a solid immersion lens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(4): 388~390
- 2 E. Betzig, J. K. Trautman, R. Wolfe *et al.*. Near-field magneto-optics and high density data storage[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(2): 142~144
- 3 J. Tominaga. An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(15): 2078~2080
- 4 Wei Chih Lin, Tsung Sheng Kao *et al.*. Study of a super-resolution optical structure: polycarbonate /ZnS-SiO₂/ZnO/ZnS-SiO₂/Ge₂Sb₂Te₅/ZnS-SiO₂[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, **42**(2B): 1029~1030
- 5 T. Arai, K. Kurihara, T. Nakano *et al.*. Carrier-to-noise ratio enhancement of super-resolution near-field structure disks by Ag nanostructure[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(5): 051104
- 6 Jooho Kim, Inoh Hwang, Jaecheol Bae *et al.*. Bit error rate characteristics of write once read many super-resolution near field structure disk [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, **45** (2B): 1370~1373
- 7 Kenya Nakai, Masayuki Ohmaki, Nobuo Takeshita *et al.*. Bit-error-rate evaluation of super-resolution near-field structure read-only memory discs with semiconductive material InSb[J]. *Jpn.*

- Appl. Phys.*, 2010, **49**: 08KE01
- 8 Qian Liu, Toshio Fukaya, Sihai Cao *et al.*. Study on readout durability of super-RENS disk[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(1): 213~218
- 9 W. C. Liu, C. Y. Wen, K. H. Chen *et al.*. Near-field images of the Ag_xO_x-type super-resolution near-field structure[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(6): 685~687
- 10 R. E. Simpson, P. Fons, X. Wang *et al.*. Non-melting super-resolution near-field apertures in Sb-Te alloys[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(16): 161906
- 11 Dietmar Hepper, Stephan Knappmann. Channel model for InSb-based superresolution optical disc system[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(10): 1923~1931
- 12 Takashi Kikukawa, Akihiro Tachibana, Hiroshi Fuji *et al.*. Recording and readout mechanisms of super-resolution near-field structure disc with silver-oxide layer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(11): 2136~2138
- 13 Weichih Liu, Din Ping Tsai. Nonlinear near-field optical effects of the AgO_x-type super-resolution near-field structure[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, **42**(2B): 1031~1032
- 14 Jooho Kim, Inoh Hwang, Duseop Yoon *et al.*. Super-resolution by elliptical bubble formation with PtO_x and AgInSbTe layers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(9): 1701~1703
- 15 Masashi Kuwahara, Takayuki Shima, Paul Fons *et al.*. On a thermally induced readout mechanism in super-resolution optical disks[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(4): 043106
- 16 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
- 17 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
- 18 Jingsong Wei, Mufei Xiao. The origin of the super-resolution via a nonlinear thin film [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281** (6): 1654~1661
- 19 Takashi Nakano, Akira Sato, Hiroshi Fuji *et al.*. Transmitted signal detection of optical disks with a superresolution near-field structure[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(2): 151~153
- 20 Din Ping Tsai, Wei Chih Lin. Probing the near fields of the super-resolution near-field optical structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(10): 1413~1415
- 21 Li Jinyan, Hou Lisong, Gan Fuxi. Effect of film thickness on optical properties of AgInSbTe phase-change films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 952~956
李进延, 侯立松, 干福熹. 薄膜厚度对薄膜厚度对 AgInSbTe 相变薄膜的光学性质的影响相变薄膜的光学性质的影响[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 952~956
- 22 H. H. Hopkins. Diffraction theory of laser read-out systems for optical video discs[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(1): 4~24
- 23 S. Olivier, B. Hyot, J. Pichon *et al.*. Report on "Surpass meeting WP1" [R]. October 21st, 2008