

# 光学超分辨技术在高密度光存储中的应用

## Application of Super Resolution Technology in High Density Storage

周辉<sup>1</sup> 赵晓枫<sup>1,2</sup> 阮昊<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所 高密度光存储实验室, 上海 201800

<sup>2</sup> 武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430072

ZHOU Hui<sup>1</sup> ZHAO Xiaofeng<sup>1,2</sup> RUAN Hao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratory of High Density Optical Storage, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

<sup>2</sup> College of Physics Science and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072

**摘 要** 综述了超分辨技术的类别原理及光学超分辨的发展状况,并给出了超分辨光学头的结构和存储机理,重点论述了光学超分辨技术在光学头中的应用。

**关键词** 光存储; 光学头; 光学超分辨

**Abstract** The principle and developing state of optical super resolution technology are reviewed, and the structure and recording principle of super resolution pick-up head are given. The application of optical super resolution in the super resolution pick-up head is emphasized.

**Key words** optical storage; optical pick-up; optical super resolution

**中图分类号** TP333.4

### 1 引言

信息时代需要高度先进的信息存储技术。人们采用的信息存储手段从最简单的纸张记录存储、缩微照相存储到目前流行的磁记录存储和光盘存储。如今市面上的光存储产品主要包括: CD-R, CD-RW, DVD-R, DVD+RW 和 DVD-RW。随着数码产品和高清电视时代的到来,存储容量更大的 HDDVD (high density-DVD) 及 Blue-ray (BD) 系列光盘也将走向普及。表 1 列出了光盘

存储密度和记录波长等参数的发展进程<sup>[1,2]</sup>。

引导光存储领域不断向前发展的一条主线是如何提高存储密度。在目前光盘存储技术中,载有信息的调制激光束通过物镜聚焦于光盘存储介质层上,记录点的尺寸决定于聚焦光的衍射极限。在光的衍射极限下,光线的聚焦直径( $d$ )与光波长( $\lambda$ )成正比,而与镜头的数值孔径( $NA$ )成反比,即  $d=1.22\frac{\lambda}{NA}$ 。所以要提高存储的位密度,就要缩短激光波长和升

高物镜的数值孔径<sup>[3,4]</sup>。从表 1 可以看出,从 CD 到 DVD,再到 HDDVD 的演进就沿着这个方向,其容量提高了近 30 倍。

但波长的减小是有限的,尤其是采用蓝光光盘之后,用传统方法来提高光盘容量变得更加困难。首先,波长的进一步减小因技术困难而十分有限,且器件本身研制困难、费用高昂。大数值孔径非球面透镜制作也比较困难,并且即使在物镜很好地校正了像差的情况下,盘片厚度的变化也将

表 1 光盘存储技术发展进程

时间	型号	记录波长/nm	单层单面容量/GB	存储密度/(GB/in <sup>2</sup> )	道间距/ $\mu\text{m}$	最小记录长度/ $\mu\text{m}$	扫描速度/(m/s)	数值孔径	数据传输速率/(MB/s)
约 20 年前	CD 系列	780	0.6	0.25	1.6	0.83	1.2~1.4	0.45	4.32
约 10 年前	DVD 系列	630/650	4.7	2.0	0.74~0.59	0.44~0.28	3.84	0.6	26~27
2006 年	HD·DVD 系列	405	15~20	10~20	0.34	0.13	12~20	0.65	36.55
2006 年	BD 系列	405	25	100	0.32	0.138	12~20	0.85	36

引起光程变化。沿这一方向提高光盘容量目前面临着难以解决的技术问题。超分辨光学头能在一定程度上解决这一矛盾。

## 2 几种超分辨技术

减小分辨极限、提高分辨率是提高光盘存储密度的传统方法,该方法可分为远场、近场两种情况。减小分辨极限的方法称为超分辨。光学头与存储记录介质之间的距离小于波长量级的范围称为近场,而大于这个距离的范围叫做远场。通常使用的光盘系统物镜距介质较远,为远场记录。

超分辨技术可分为光学超分辨、介质超分辨技术。其中光学超分辨技术主要包括光学变迹术、近场探针记录技术和超分辨率近场结构技术,而光学变迹术属于远场超分辨,其他为近场超分辨。介质超分辨技术主要指磁致超分辨技术(MSR),用于磁光存储领域。

### 2.1 光学变迹术

所谓变迹术 (apodization)是指确定光瞳函数的适当形式,以实现光学系统最佳的成像效果。光学变迹术是光学超分辨技术的一种有效方法,属于远场记录。它与通常使用的光盘系统一样,以夫琅禾费衍射、瑞利判据  $d = \frac{k\lambda}{NA}$  为基础,但系数  $k$  值减小。光学变



图 1 环形二元滤波器

迹术可由在光学系统的孔径上加装光瞳滤波器来实现,如中心遮挡的圆环、 $\pi$  相位型双带滤波器、由一系列任意半径和相位及振幅透过率的同心圆环组成的滤波器等。Manuel 等<sup>[9]</sup>提出的可调二元环形滤波器就是一种改变光瞳振幅分布的滤波器,如图 1 所示,此滤波器比透射系数为连续变化的滤波器在硬件方面更易实现,它能有效提高纵向分辨率,同时不降低横向分辨率。光瞳滤波的基本思想是:通过改变光瞳函数的复振幅(包括相位和振幅)分布来控制光学系统出瞳的传递函数,任何两点分辨判据可被任意改进。超衍射光斑振幅的中央主光斑半径较全孔径时小,导致读出系统空间响应频率的改进。这种方法能减小读出光斑,实现超分辨读出;但同时造成强烈的背景

噪声,影响读出信号的对比度。在理想情况下,能使光斑缩小 80% 左右,再辅以采用更小波长的激光器并对编码方式做改进,可期望达到 10~15 GB 的容量。这正是我们目前所研究的内容,虽然容量不是特高,但是可操作性强,实现相对来说容易一些,具有实用化潜力。

### 2.2 近场探针记录

近场探针记录又称探针扫描显微术 (probe scanning microscopy, PSM)<sup>[6-9]</sup>,而最近很热门的超分辨率近场结构 (super-resolution near field structure, Super-RENS) 是由 PSM 演化出来的另一类近场探针记录方法。PSM 是在扫描近场光学显微镜 (NSOM) 基础上发展起来的一种新型超分辨存储方式。PSM 原理是:在近场范围内将激光束通过非常小的孔径 (大多数采用光纤探针),对存储介质进行记录和读写,通过小孔的光可在光盘上形成尺寸和小孔相当的记录点。基本原理图如图 2 所示<sup>[10]</sup>。这种方法运用光纤作为光传播途径。将光纤的顶端拉伸成具有微小孔径的探针,这样光束只能从光纤微小孔径内射出,当探针头与记录层表面的距离小于半个波长时,光束不分散,从而获得微小的记录光斑。

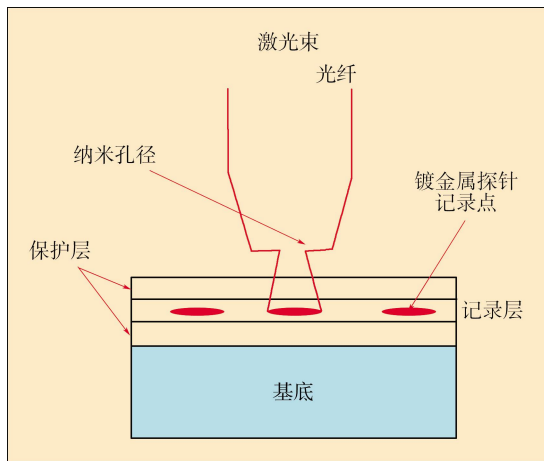


图 2 PSM 记录原理图

这种记录方式属于近场记录，需要超净的环境且记录介质与光学头之间不能存在保护层。另外，探针的飞行高度比较难控制，动态稳定性较差。由于当光波在小于波长的光纤中传输时，呈现能量快速衰减的模式。在这种模式下，出射光强较弱，所以探测时需要使用光电倍增器件来获取信号，导致读写信号弱，信噪比(CNR)低。这些不利因素制约了近场探针记录在产业中的应用。采用该技术能使光斑大小做到 100 nm，理论存储容量达 50 GB，但实现起来相当困难，不具实用化潜力。

### 2.3 超分辨率近场结构

Super-RENS 技术是 1998 年由 J. Tominaga 等<sup>[11-13]</sup>提出，近年发展起来的一种集超分辨光盘技术和近场光存储技术于一身的新技术。它利用孔径层介质在强光作用下的非线性效应和表面等离子激元场增强效应来实现亚波长尺寸光学存储。该技术通过改进现有光盘结构来实现：在盘片中距记录层 20~50 nm(小于近场距离)处增加一层掩模层，同时去掉

反射层。它实现超分辨的关键是制作在激光作用下光学性质发生快速可逆变化的掩模层。掩模层在激光照射下会产生纳米小孔，由于激光光斑能量的高斯分布所产生的小孔直径要小于聚焦光斑直径，从而实现超衍射分辨记录<sup>[14]</sup>。图 3 为 Super-RENS 的原理图。光透过掩模层后，由于掩模层与记录层的距离在 50 nm 之内，属近场范围(也即菲涅耳深区)，光在这段距离内的传播可以近似为按几何光学进行，到达记录层上光的分布基本上为掩模层孔径的投影，使得记录膜上的记

录畴尺寸小于光的衍射极限<sup>[15]</sup>。按照掩模材料的性质和作用，可将掩模超分辨近场结构分为孔径型(以 Sb 为掩模层材料)、散射中心型(以  $AgO_x$  为掩模层材料)等。

这种存储方法有许多优点，如近场距离固定，近场孔径尺寸可以通过改变到达盘面的激光功率来调整，可与现有的很多技术兼容。但其缺点亦十分明显，如响应时间慢、读出能量高及信噪比低等，另外热稳定性达不到要求。该技术可使光斑大小达 50 nm，理论容量能做到 100~200 GB，如韩国三星公司采用该技术实现了 200 GB 存储容量。但这种方案实现起来并不容易，现基本停留于实验室阶段，且只是静态试验，即只是获得 100 nm 或更小的记录点，并没有做成光盘，更不能转动读取。它有实现的可能性，但市场潜力很小。

PSM 和 Super-RENS 这两种方案都是近场法，其实际应用状况都只停留于实验室阶段，很难实用化，或使用成本很高或使用条件相当苛刻。只有光学变迹术方案相对来说易实现，成本低，即使密度只有 15 GB，它还可以作

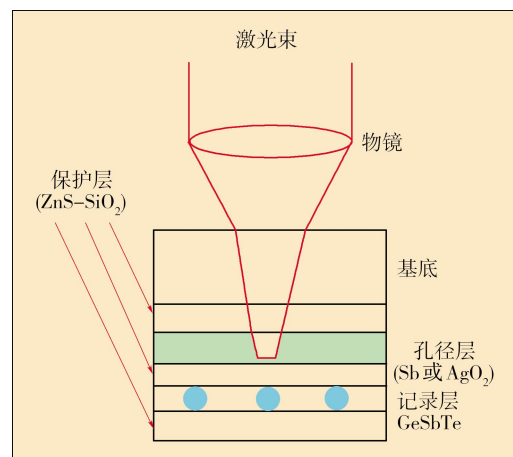


图 3 Super-RENS 结构记录原理图

为 NVD 光盘标准的一项关键技术,实现自主知识产权。NVD 是由上海国家光盘工程中心联合国内几家单位提出的一种红光高清存储标准,以其成本优势对抗 HDDVD、BD 的竞争。

### 3 光学超分辨技术的发展

19 世纪末,阿贝和瑞利就提出了衍射效应是由有限尺度的光瞳引起的观点,并从不同的角度给出了光学系统分辨率的阿贝衍射极限频率和瑞利判据。为人们提供了突破光学系统衍射极限的方法和依据。阿贝认为,除非物镜的孔径无穷大,否则其作用相当于一个低通滤波器。瑞利则从系统对两点物成像在像方的强度分布角度对系统的分辨能力给出了定义。

1955 年 Francia 等<sup>[16]</sup>也提出了超过阿贝衍射极限的可能性,但对所观察的物体要有预知信息;1964 年 Harris<sup>[17]</sup>指出,这个预知信息只需物体大小是有限,对于大物体只需把照明限制在有限区域即可。自从瑞利提出光学系统的衍射极限以来,人们提出了各种着眼于压缩艾里斑来提高分辨率的方法:Francia 等<sup>[16]</sup>根据超接收天线设计原理提出,在光学系统的出瞳中插入一个由无限窄的同心圆环或有限宽的同心圆环组成,但每个环具有不同的振幅和相位透过率的滤波器,可以把衍射主瓣压缩到任意小,从而提高由衍射主瓣决定的分辨率。人们曾用软边光阑来降低衍射次极大的能量,用于提高亮度相差很大的两点的分辨率,又用圆环光阑使衍射主极大的半径变小从而提高分辨率。

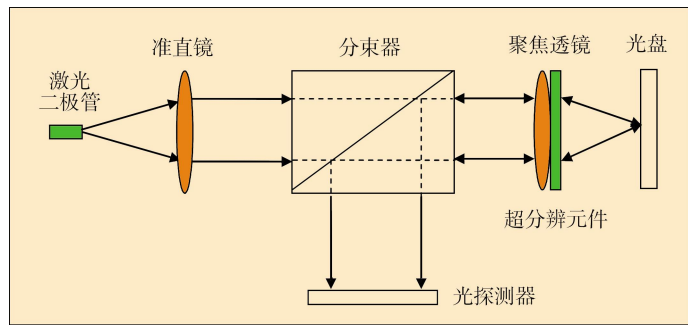


图 4 含有超分辨元件的光学读取头简图

在光存储领域,为了得到更小的记录点尺寸和激光聚焦光斑,除了改变波长和数值孔径外,人们提出了各种方法用于设计超衍射极限的聚焦透镜。Yutaka 等<sup>[18]</sup>提出在物镜前的准直光路中加一挡板,这样在聚焦光斑中产生干涉相消,得到更加锐利的主瓣,利用狭缝滤掉两侧的旁瓣,就可用于光盘超分辨记录和读取。后来, Takaya<sup>[19]</sup>用横向滤波器代替了狭缝,使得该方法向实用化迈出了第一步。Hideo<sup>[20]</sup>计算了不同同心圆环组成的相移变迹器,对优化后所产生的超分辨效果进行了比较。可见,针对光学系统的超分辨技术都是建立在减小瑞利判据决定的衍射斑大小的基础上的。

### 4 光学超分辨技术在光学头中的应用

由前面各种超分辨实现途径可看出,它们各有其优越性和不足。从现实应用角度考虑,采用光瞳滤波器的光学变迹术比较可行。光学头是光盘驱动器中的关键元器件,将超分辨技术应用到现有光学头中,可以在不改变物镜的数值孔径或波长情况下减小读出光斑,突破衍射极限。这种光学头称为超分辨光学头,可通过将光瞳滤波器加入 DVD 光学头

中来实现,从而获得更高光盘存储容量。

光学超分辨系统是一种比例分辨率放大系统,其对系统分辨率的提高程度取决于光瞳滤波器本身的超分辨增益。而超分辨增益只与光瞳本身的结构设计有关,与系统的数值孔径、波长无关。因此光学超分辨技术除可用于已有的 CD、DVD 系统以提高分辨率外,还可以运用到蓝光的 BD、HD DVD 中,前景广阔。

#### 4.1 超分辨光学头系统结构

图 4 所示为一个带有超分辨元件的典型光学头的结构图。从激光器出射的激光用一个准直镜准直,然后经过分束器并被透镜聚焦,该透镜被超分辨元件变迹到光盘上。激光通过超分辨光瞳之后,会在光盘表面形成一个压缩焦斑。超分辨光学头与传统的 DVD 光学头在结构上最大及唯一的差别就在于超分辨元件。传统光学头加上超分辨光瞳就变成超分辨光学头。

#### 4.2 超分辨元件结构与超分辨行为

图 5 给出的是三段式相移光瞳。该光瞳三段的相位分别是 0,  $\Phi$  和 0, 三段半径分别是  $a, b$  和 1。通过对透过率和结构参数(如各区半径)的设计,可轻松实现对中央主瓣大小的调制,从而得到

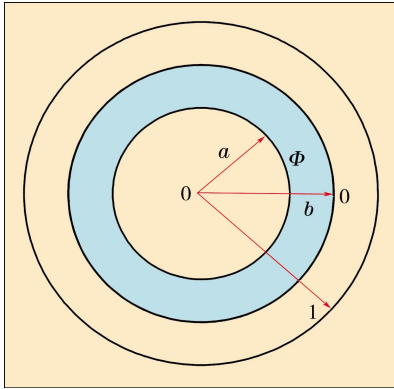


图 5 超分辨光瞳的结构

超分辨效果。

光瞳的超分辨行为常用如下一些量来描述：斯特列尔比  $S$ ，半宽比  $HWR$  和旁瓣强度比  $SIR$ <sup>[21]</sup>。 $S$  是一个用来分析成像质量的相对参数，被定义为焦点强度与相应的未整形光束强度之比。半宽比被定义为超分辨图样主瓣的半宽度与艾里斑半宽度之比，能作为超分辨性能的一种测量。旁瓣比被定义为最大旁瓣强度与主瓣强度之比。光学头中用到的光瞳要求具有高的斯特列尔比和低的半波比及旁瓣比。

### 4.3 超分辨理论

Sheppard 等<sup>[22]</sup>通过使用旋转对称振幅光瞳函数在标量衍射理论框架内分析了几何焦点附近的衍射强度分布。函数  $P(\rho)$  定义为光瞳的复透过率，或光瞳函数。通用复合光瞳函数可被写成  $P(\rho) = T(\rho)\exp[i\varphi(\rho)]$ ， $\rho$  是在环形光瞳上的归一化径向坐标， $T(\rho)$  是透过率函数， $\varphi(\rho)$  是相位函数。由此则在共焦区的归一化场复振幅可写为<sup>[23, 24]</sup>

$$U(v, u) = 2 \int_0^1 P(\rho) J_0(v, \rho) \exp\left(-\frac{i u \rho^2}{2}\right) \rho d\rho \quad (1)$$

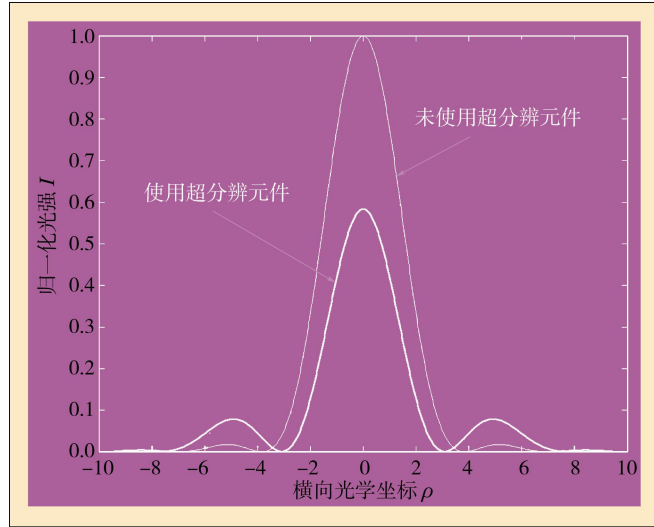


图 6 超分辨情况下与非超分辨情况下横向光强分布对比

这里  $v$  对应接收面上的径向坐标  $r$ ， $u$  对应以焦点为原点的轴上坐标  $z$ ，其表达式如下(假定折射率  $n=1.0$ )：

$$v = k r \sin\alpha \quad (2)$$

$$u = 4k z \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

其中  $k=2\pi/\lambda$ ， $\sin\alpha$  代表数值孔径。在焦面上有

$$U(v, 0) = 2 \int_0^1 P(\rho) J_0(v, \rho) \rho d\rho \quad (4)$$

可见横向振幅是光瞳函数的汉克尔变换。沿轴向有

$$U(0, u) = 2 \int_0^1 P(\rho) \exp\left(-\frac{i u \rho^2}{2}\right) \rho d\rho \quad (5)$$

令  $t=\rho^2$ ，则  $P(\rho)$  可写作  $Q(t)$ ，可被定义为等效光瞳函数。方程(5)可写为

$$U(0, u) = \int_0^1 Q(t) \exp\left(-\frac{i u t}{2}\right) dt \quad (6)$$

可见轴向振幅是等效光瞳函数  $Q(t)$  的傅里叶变换。众所周知，光瞳函数的值在衍射极限中被定义为  $P(\rho)=1$ ，于是通过改变光瞳函数  $P(\rho)$  可以实现超分辨。

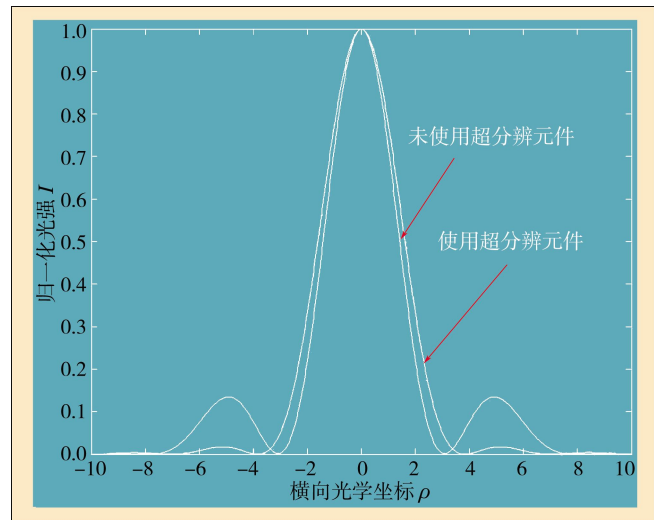


图 7 两种情况下归一化横向光强对比

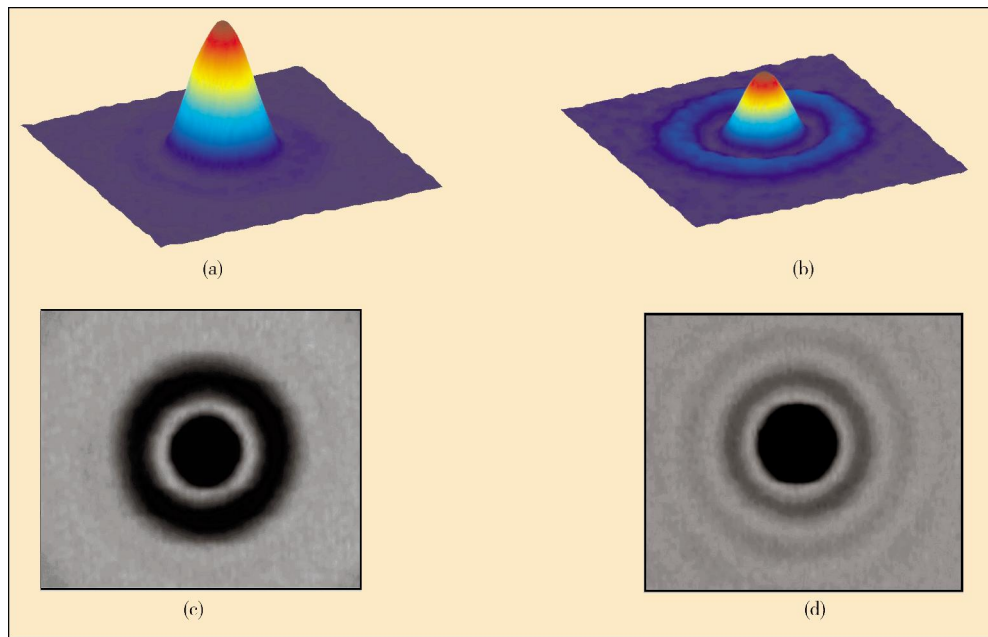


图 8 艾里条纹(a)、(c)与压缩比为 0.8 的中央衍射斑的超分辨结果(b)、(d)

#### 4.4 超分辨效果

对于三段式相移光瞳, 通过设定不同的  $a, b, \Phi$  参数, 进行数值模拟, 可以取得一系列最优值, 然后从这些最优值中找到最佳的参数组合。比如当超分辨相位板参数取  $a=0.09, b=0.36, \Phi=0.9\pi$  时, 计算结果为  $HWR=0.8, S=0.58, SIR=13.49\%$ 。其中, 第一旁瓣峰值位置及强度分别为 4.9 和 0.0787, 而在艾里情况下则为 5.14 和 0.0175。采用该相位板时光斑尺寸可压缩至原来的 0.8, 中心瓣光强度为原来的 0.58, 旁瓣相对强度为 13.49%。图 6、图 7 为使用超分辨元件与没有使用超分辨元件时归一化横向光强分布对比示意图。

图 8(a)、(c)为由一个 CCD 照相机接收的无超分辨艾里图纹。图 8(b)、(d)为装入超分辨元件后

的艾里条纹。其中图 8(a)、(b)为三维强度分布图, (c)、(d)为 CCD 拍摄图样, 若进行深入的相关研究, 有望实现更高存储密度的超分辨光学头。

#### 5 结束语

超分辨位相板确实能在不改变物镜的数值孔径或减小波长情况下减小读出光斑, 能最大限度利用现有 DVD 技术实现更高密度的光盘存储, 它以其结构简单, 成本低廉, 便于大规模制造和市场化等显著优点获得越来越多研究机构的关注。并已经用到了即将面世的下一代光存储产品(HDDVD)中, 并成为其核心技术之一。

超分辨元件应用于光学头还面临一些技术问题: 1) 加入超分辨相位板后对光斑的影响程度。

加入相位板后光斑的尺寸将会被压缩并突破衍射极限, 但随着光斑尺寸的减小, 光斑的中心瓣能量也将随之减小且旁瓣强度增加, 必须采取措施使主瓣能量的减小不至于影响对光盘的读写, 而旁瓣能量增加不至于对读取信号产生串扰。2) 超分辨元件在现有光路中的不同插入位置对系统有不同影响, 而且还会带来系统像差等变化。

收稿日期: 2006-06-29

作者简介: 周辉(1981-), 男, 湖北人, 中科院上海光机所硕士研究生, 主要从事光学头设计及光学超分辨技术在光学头上应用方面的研究。

E-mail: zhdreamweaver@yahoo.com.cn

导师简介: 阮昊(1971-), 男, 中科院上海光机所研究员, 主要从事超高密度数字光存储, 光学头技术, DVD 母盘的生产、研发、检测等方面的工作。

## 参 考 文 献

- 1 干福熹. 数字光盘存储技术[M]. 北京:科学出版社, 1998, 277~279
- 2 徐端颐. 光盘存储系统设计原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2000, 25~37
- 3 梁铨廷. 物理光学[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1980, 126~131
- 4 Miyagawa N, Gotoh Y, Ohno E. Land and groove recording for high track density on phase-change optical disks[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, **32**(11B):5324
- 5 Manuel M C, Pedro A, Jorge O C. Tunable axial super resolution by annular binary filters[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **119**: 491~498
- 6 D W Pohl, W Denk, M Lenz. Optical Spectroscopy: Image recording with resolution  $\lambda/20$ [J]. *J. Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44** (7):651~653
- 7 H J Mamin, S Chiang, H Birk *et al.*. Gold deposition from a scanning tunneling microscope tip [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1991, **B9**(2):1398~1402
- 8 R.E. Betzig, J. K. Trautman, R Wolfe *et al.*. High density near-field optical recording [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(10): 5791
- 9 Sumio Hosaka, Toshimichi Shintani, Mitsuhide Miyamoto *et al.*. Nanometer-sized phase-change recording using a scanning near-field optical microscopy with a laser diode[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**:443~447
- 10 刘继桥, 刘之景, 王克逸. 近场光学高密度存储研究进展[J]. 自然杂志, 2002, **24**(6):330~334
- 11 Tominaga J, Nakano T, Atoda N. An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film[J]. *J. Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(15):2078~2080
- 12 Tominaga J, Nakano T, Atoda N. Super resolution structure for optical data storage by near-field optics[C]. *SPIE*, 1998, **3467**:282~286
- 13 Junji Tominaga, Hiroshi Fuji, Akira Sato *et al.*. The near-field Super-resolution properties of an antimony thin film[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, **37**(11A), L1323~L1325
- 14 魏劲松, 干福熹. Sb掩膜型超分辨近场结构光存储技术及机理研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2004, 19~24
- 15 魏劲松, 张约品, 阮昊 等. 近场光存储及其研究进展[J]. 物理学进展, 2002, **22**(2):188~197
- 16 G. Toraldo di Francia. Resolving power and information[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1955, **45**(10):497~501
- 17 J L Harris. Diffraction and resolution power[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, **54**(7):931~936
- 18 Yutaka Yamanaka, Yutaka Hirose, Hiroaki Fuji *et al.*. High density recording by super resolution in an optical memory system[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(20):3046~3049.
- 19 Takaya Tanabe, Super resolution readout system with electrical equalization for optical disks [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34** (29):6769~6772
- 20 Hideo Ando, Phase-shifting apodizer of three or more portions[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, **31**:557~567
- 21 Haifeng Wang, Fuxi Gan. High focal depth with a pure-phase apodizer[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(31):5658~5662
- 22 C.J.R. Sheppard, Z.S. Hegedus. Axial behavior of pupil-plane filters[J], *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(5):643~647
- 23 I.J. Cox, C.J.R. Sheppard, T. Wilson. Reappraisal of arrays of concentric annuli as super resolving filters [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(9):1287~1291
- 24 T.R.M. Sales, G.M. Morris, Diffractive superresolution elements[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(7):1637~1646