

文章编号 : 0253-2239(2001)10-1260-04

用相移光阑延长高密度数字化视频光盘 物镜焦深的研究*

王海凤 陈仲裕 干福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 提出了一种利用优化了的三带相位型超分辨光阑来延长高密度数字化视频光盘(HD-DVD)的焦深的方法, 同时使得聚焦光斑进一步减小。利用该器件可以将高密度数字化视频光盘的焦深延长到目前数字化视频光盘(DVD)的焦深长度, 并且轴向强度分布也得到了优化。

关键词: 高密度数字化视频光盘; 轴向强度分布; 半宽比; 中心峰值强度比

中图分类号: TN203 文献标识码: A

1 引 言

在光盘存储系统中, 为了提高存储密度, 要求有高数值孔径的聚焦物镜和短波长的激光。聚焦光斑的尺寸 D 和焦深 L 可分别表示为

$$D = 0.5\lambda/\text{NA}, \quad L = \lambda(\text{NA})^2,$$

其中 λ 为激光波长, NA 为聚焦物镜的数值孔径。 D 定义为在强度分布的峰值强度一半处的宽度, L 定义为在轴向强度降低到峰值强度 80% 处的宽度。目前的数字化视频光盘使用的激光波长为 $0.65 \mu\text{m}$, 聚焦物镜的数值孔径为 0.6, 因而其聚焦光斑尺寸和焦深长度分别为 $D = 0.54 \mu\text{m}$ 和 $L = 1.8 \mu\text{m}$ 。

目前数字化视频光盘的最小记录坑长为 $0.4 \mu\text{m}$, 其相应于聚焦光斑束腰处强度降低为最大值的 70% 时的宽度。下一代数字化视频光盘即高密度数字化视频光盘的容量将为 13 G 到 15 G 字节^[1-3], 物镜数值孔径为 0.85 左右。和目前的数字化视频光盘相比, 使用激光的波长由红光变成了蓝光, 物镜的数值孔径由 0.6 变为 0.85 左右。对于一个物镜数值孔径为 0.85、激光波长为 $0.5145 \mu\text{m}$ 的驱动器, 其光斑尺寸和焦深分别为 $D' = 0.3 \mu\text{m}$, $L' = 0.712 \mu\text{m}$, 如果我们同样以强度降低到 70% 处的宽度作为该驱动器可读取的最小坑长时, 其可读取的最小记录坑长为 $0.224 \mu\text{m}$, 显然, 该系统的配置

符合高密度数字化视频光盘的基本要求, 但是其焦深太短, 使得调焦伺服系统很难跟踪盘片的跳动。延长焦深的方法主要可分为两类, 第一类是只改变入射光瞳面上的振幅分布的方法^[4,5], 第二类是同时改变光瞳面上振幅和相位分布的方法^[6-9], 以往的方法多是通过理想化的分析结果, 其所给出的光瞳面上的振幅和相位分布比较复杂, 所以器件难以制作, 而且由于有振幅的限制所以其效率较低, 也有利用衍射光学元件延长焦深的方法^[10], 但其系统较复杂, 且其轴向分布没有给出。本文提出了一种分别对轴向和径向强度分布进行优化了的纯相位型超分辨光阑, 用于延长高密度数字化视频光盘的焦深, 使其具有目前数字化视频光盘的焦深长度, 轴向焦点附近强度分布更加均匀, 径向强度分布的旁瓣峰值强度低于主斑峰值强度的 20%, 该器件结构简单, 容易大量生产和复制。上述半宽比定义为加变迹器后聚焦光束沿径向的强度降低为峰值强度一半时的全宽度与原始系统聚焦光束沿径向的强度降低为峰值强度一半时的全宽度之比。斯特尔比定义为加变迹器后聚焦光束沿径向的中心峰值强度与原始系统聚焦光束沿径向的中心峰值强度之比。旁瓣相对强度定义为第一旁瓣的峰值强度与主斑的峰值强度之比。

2 方法和原理

图 1 表示准直光束通过超分辨光阑后被物镜聚焦在光盘表面上。为方便讨论, 假定该系统被单位强度均匀准直光束照明, 则聚焦后的振幅分布可表

* 中国科学院高密度光存储项目(KJ951-B1-702-03)资助课题

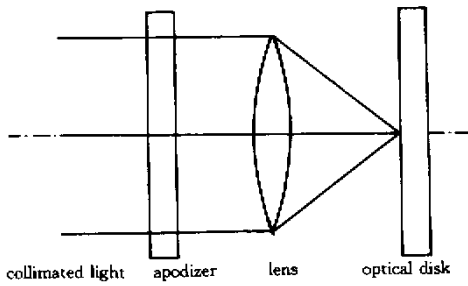


Fig. 1 System setup

示为^[11-13]

$$G(\rho, u) = 2 \sum_{j=1}^N e^{i\varphi_j} \int_{r_{j-1}}^{r_j} r J_0(\rho r) e^{-iu r^2/2} dr, \quad (1)$$

其中, r 为物镜光瞳面上的径向坐标, $\{\varphi\} = \varphi_j, j = 1, 2, \dots, N$, 为系统光瞳面上第 j 带的相位, $\{r\} = r_j, j = 0, 1, \dots, N$, 为第 j 带的径向位置, $r_0 = 0, r_N = 1$; ρ 和 u 为简化的像方径向和轴向坐标, 其可表示为

$$\rho = \frac{2\pi}{\lambda}(\text{NA})R, \quad (2)$$

$$u = \frac{2\pi}{\lambda}(\text{NA})^2 Z, \quad (3)$$

其中 R 和 Z 分别为像方实际径向和轴向坐标, NA 为物镜的数值孔径。

在光束聚焦后的束腰面上, 也就是 $Z = 0$ 处, 或 $u = 0$ 处, 其振幅分布可表示为

$$G(\rho) = 2 \sum_{j=1}^N e^{i\varphi_j} \int_{r_{j-1}}^{r_j} r J_0(\rho r) dr = \frac{2}{\rho} \sum_{j=1}^N e^{i\varphi_j} [r_j J_1(\rho r_j) - r_{j-1} J_1(\rho r_{j-1})] \quad (4)$$

对于如图 2 所示的三带 π 相位型超分辨光阑, 三带的相位分别为 $0, \pi$ 和 0 , 三个环带的半径分别为 b, a 和 1 , 因而, 聚焦束腰平面上的振幅分布可表示为

$$G(\rho) = \frac{2}{\rho} \{J_1(\rho) - a J_1(a\rho) - b J_1(b\rho)\}. \quad (5)$$

中心峰值强度比为

$$S = \left[\frac{G_{a \neq b}(0)}{G_{a=b=0}(0)} \right]^2 = [1 - \mathcal{A}(a^2 - b^2)]^2. \quad (6)$$

在 ρ 值很小时, 利用下式

$$J_1(z) = \left(\frac{z}{2}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (z/2)^{2n}}{n(n+1)!} = 2.0 \left(\frac{z}{4}\right) - 4 \left(\frac{z}{4}\right)^3 + 2.7 \left(\frac{z}{4}\right)^5 - 0.89 \left(\frac{z}{4}\right)^7 + 0.18 \left(\frac{z}{4}\right)^9 - \dots$$

得贝塞尔函数的三次近似, 并代入(5)式得

$$G(\rho) = 1 - \mathcal{A}(a^2 - b^2) + \rho^2 \left(\frac{a^2 - b^2}{4} - \frac{1}{8} \right). \quad (7)$$

半宽比为

$$H = \left[\frac{1 - \mathcal{A}(a^2 - b^2)}{1 - \mathcal{A}(a^4 - b^4)} \right]^{1/2}. \quad (8)$$

轴上的振幅分布可表示为

$$G(u) = 2 \sum_{j=1}^N e^{i\varphi_j} \int_{r_{j-1}}^{r_j} r e^{-iu r^2/2} dr = \frac{2}{iu} [e^{-iu/2} - 1 - 2(e^{-ia^2/2} - e^{-ib^2/2})]. \quad (9)$$

轴上的光强可表示为

$$I(u) = |G(u)|^2 = 10 + 16 \sin \left[\frac{u}{4}(a^2 - b^2) \right] \sin \frac{u}{4} \cos \left[\frac{u}{4}(1 - a^2 - b^2) \right] - 8 \cos \left[\frac{u}{2}(a^2 - b^2) \right] - 2 \cos \frac{u}{2}. \quad (10)$$

由(6)式和(10)式得

$$I(u) = 10 + 16 \sin \left[\frac{u}{4} \left(\frac{1 - S^{1/2}}{2} \right) \right] \times \sin \frac{u}{2} \cos \left[\frac{u}{4} \left(1 - 2b^2 - \frac{1 - S^{1/2}}{2} \right) \right] - 8 \cos \left[\frac{u}{2} \left(\frac{1 - S^{1/2}}{2} \right) \right] - 2 \cos \frac{u}{2}. \quad (11)$$

(11)式表明, 三带 π 相位型超分辨光阑的轴向强度分布由两个参数决定, 一是聚焦光束束腰处的中心峰值强度比, 另一个是内环半径 b 。对于特定中心峰值强度比, 轴向强度分布由内环半径 b 决定, 因而, 可通过适当选取内环半径 b 来优化轴向强度分布。

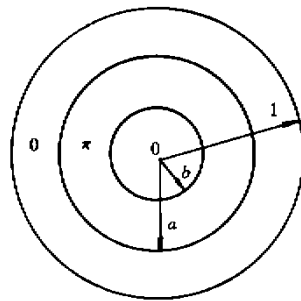


Fig. 2 Structure of the apodizer

3 模拟计算

对波长为 $\lambda = 0.5145 \mu\text{m}$ 、物镜数值孔径为 $\text{NA} = 0.85$ 的光学系统进行了模拟计算。未加光阑的光学系统焦深为 $0.712 \mu\text{m}$, 加了光阑后焦深变为 $2.290 \mu\text{m}$, 是加光阑前的 3.185 倍。

图 3 为系统加光阑和未加光阑时轴向强度分布的比较图,实线相应于加超分辨光阑后的情形,虚线相应于未加超分辨光阑的情形,为加强对比,图中曲线已进行了归一化。

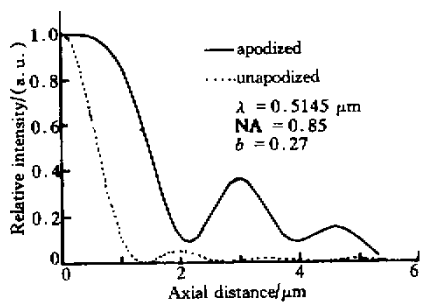


Fig. 3 Axial intensity distribution of the apodized and unapodized system

图 4 为系统加光阑后的离焦特性,聚焦光束束腰处的半宽比为 0.8,当离焦量为 1.145 μm 时,也就是轴向强度降低到峰值强度的 80% 处,其半宽比为 0.9,仍然小于未加光阑时的聚焦光斑的尺寸。

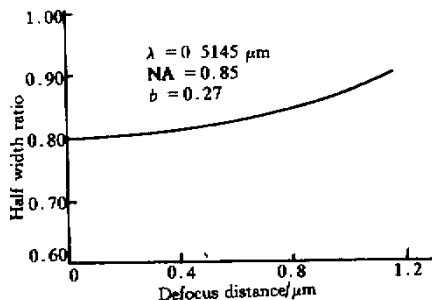


Fig. 4 Half-width-ratio versus defocus distance

图 5 是未加光阑时所得的三维光强分布图,容易看出,随着离焦量的增大,轴向光强迅速降低,从图 3 中(虚线部分)也可看出这个现象。

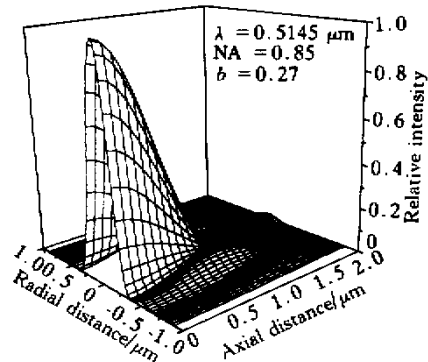


Fig. 5 Intensity distribution of the unapodized system

图 6 是加了光阑后的光强分布图,容易看出,在一定范围内,轴向强度变化很小,光束束腰处的中心

峰值强度比为 0.30。

图 7 是加了光阑后系统预期可读取的最小记录点大小,容易看出,当离焦量为 1 μm 时,系统可读取的最小记录点尺寸仍小于 0.2 μm。

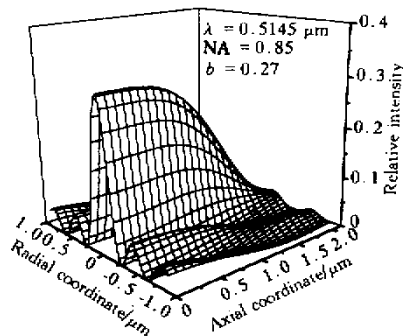


Fig. 6 Intensity distribution of the apodized system

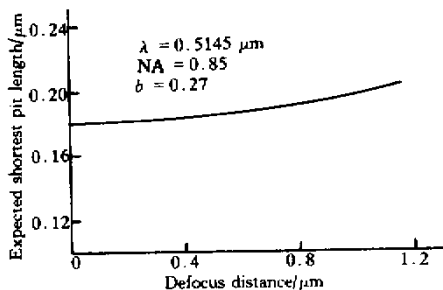


Fig. 7 The expected shortest pit length versus defocus distance of the apodized system

结论 提出了利用三带 π 相位型超分辨光阑延长下一代数字化视频光盘的焦深,并进一步缩小光斑的方法,使得下一代数字化视频光盘的焦深长度达到目前数字化视频光盘的焦深尺度,轴向强度分布更加均匀,径向强度分布的旁瓣峰值强度低于主斑峰值强度的 20%,该器件结构简单,容易大量生产和复制。

本文的工作得到了王桂英老师和邓小强同学的支持与帮助,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

[1] Higuchi T, Okumura Y, Iida T. High-density optical disc mastering using photobleachable dye. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, 37(4B) 2130~2136
 [2] Kojima Y, Kitahara H, Kasono O. High density mastering using electron beam. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, 37(4B) 2137~2143
 [3] Yokogawa F, Ohsawa S, Iida T. The path from a digital versatile disc (DVD) using a red laser to a DVD using a blue laser. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, 37(4B) 2176~2178

- [4] Welford W T. Use of annular apertures to increase focal depth. *J. Opt. Soc. Am.* ,1960 ,**50**(8):749~753
- [5] Ojeda-Castaneda J , Andres P , Diaz A. Annular apodizers for low sensitivity to defocus and to spherical aberration. *Opt. Lett.* ,1986 ,**11**(8)487~489
- [6] Ojeda-Castaneda J , Berriel-Valdos L R , Montes E. Spatial filter for increasing the depth of focus. *Opt. Lett.* ,1985 ,**10**(11)520~522
- [7] Ojeda-Castaneda J , Berriel-Valdos L R. Arbitrarily high focal depth with finite apertures. *Opt. Lett.* ,1988 ,**13**(3):183~185
- [8] Indebetouw G , Bai H. Imaging with Fresnel zone pupil masks : Extended depth of field. *Appl. Opt.* ,1984 ,**23**(23)4299~4302
- [9] Ojeda-Castaneda J , Berriel-Valdos L R , Montes E L. Line-spread function relatively insensitive to defocus. *Opt. Lett.* ,1983 ,**8**(8)458~460
- [10] Yang Guoguang. An optical pickup using a diffractive optical element for a high-density optical disc. *Opt. Commun.* ,1999 ,**159**(1):19~22
- [11] Ando H. Phase-shifting apodizer of three or more portions. *Jpn. J. Appl. Phys.* ,1992 ,**31**(2B):557~567
- [12] Sales T R M , Morris G M. Fundamental limits of optical superresolution. *Opt. Lett.* ,**22**(9)582~584
- [13] Sales T R M , Morris G M. Diffractive superresolution elements. *J. Opt. Soc. Am. (A)* ,1997 ,**14**(7):1637~1646

Use of Supperresolution Apodizer to Increase the Focal Depth of HD-DVD

Wang Haifeng Chen Zhongyu Gan Fuxi

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

(Received 11 July 2000 ; revised 7 September 2000)

Abstract : It is proposed that using a optimized three-proton phase-shifting apodizer to increase the depth of focus of the next generation digital versatile disk (DVD) and at the same time minimize the spot size. It makes the depth of focus of next generation DVD comparable to current DVD. The simulation result shows that an optical system with this apodizer also has a good defocus characteristic.

Key words : high density digital versatile disk (HD-DVD) ; axial intensity distribution ; half-width-ratio ; center-peak-intensity-ratio