

集成光学平板光盘读出头研制*

恩 德^{1,2} 陈才和¹ 崔宇明¹ 丁桂兰¹ 刘 杰¹

(1 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2 内蒙古民族大学数学与计算机学院, 通辽 028043)

摘 要 采用集成光学方法, 将非球面消球差双凸波导透镜、双光栅会聚光波导透镜、光波导转向棱镜单片集成在铌酸锂基底上构成光学平板光盘读出头. 集成光学平板光盘读出头克服了微透镜光盘读出头体积大、组装复杂的不足, 实现了光盘读出头的集成化, 提高了系统的可靠性. 光斑理论值 $0.475 \mu\text{m}$, 实测值 $0.67 \mu\text{m}$.

关键词 集成光学光盘平板读出头; 非球面消球差双凸波导透镜; 双光栅会聚光波导透镜; 光波导转向棱镜

中图分类号 TN25 **文献标识码** A

0 引言

在多种存储介质中, 光盘由于其信息存储密度高、单位信息位价格低、数据速率高、随机存取方便、能与计算机及现代通讯设备联机使用、半永久性存档、非接触读/写/擦等优点, 在信息存储领域中占有重要的地位. 70 年代初开始, 光盘^[1]经历了模拟到数字, 声音到图象, 大盘到小盘的过程, 除了有高密度光盘、大容量半导体存储器因素外, 高分辨率激光光盘读出头技术^[2]是关键. 传统的分立组件微透镜光盘读出头^[3]是由柱面透镜、物镜、棱镜偏振分束系统 (PBS)、光栅、 $1/4$ 波片^[4]组成. 光盘读出头元件个数多、组装调试复杂. 经过光学设计技术的改进、生产工艺的提高, 在从 1982 ~ 1986 年的短短四年里^[5], 物镜和准直透镜合二为一, 光盘物镜^[6]零件总数也由五片锐减为一片.

尽管如此, 由此构成的光盘读出头仍然是分立组件模式. 体积和重量都很大, 影响光盘读出头的读写速度, 由于采用分立组件, 生产成本低、一致性差. 为了满足光盘读出头更轻、更小、更可靠的要求, 达到光盘读出头的高速寻址、快速定位, 必须设法减少组件个数、降低光盘读出头的重量, 集成光学光盘读出头是解决这个问题的一种有效途径. 我们研制的集成光学平板光盘读出头, 将非球面消球差双凸波导透镜 (ADCAWL)、双光栅会聚光波导透镜 (TGFBS)、光波导转向棱镜 (WDP)、平面光波导 ($\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ POW) 单片集成, 采用光集成工艺, 把从光源到检测等功能都单片集成在同一铌酸锂

(LiNbO_3) 基片上, 具有单片集成、体积小、成本低、稳定可靠等优点.

1 工作原理与结构

集成光学平板光盘读出头实现了集成光学平板光盘读出头芯片与自聚焦透镜、光源、探测器混合集成, 该集成芯片在 Z 切铌酸锂基片上, 将非球面消球差双凸光波导透镜、双光栅会聚光波导透镜 (TGFBS) 和一对光波导转向棱镜单片集成在同一铌酸锂 (LiNbO_3) 基片上, 并与光源 LD、光电探测器、自聚焦透镜 (AFL) 混合集成. LD 发出的激光束经端面耦合进入钛扩散铌酸锂平面波导, 经光波导透镜由波导输出端和自聚焦透镜折射进入空气后, 光斑会聚于光盘上. 从光盘返回的光束携带光盘信息再次由端面耦合返回波导, 经双光栅会聚光波导透镜分为两束, 并由光波导转向棱镜转向, 由器件两侧的光电探测器接收, 实现光盘信息及聚焦误差信号与跟踪径向误差信号的快速、高精度读出. 集成光学光盘读出头的结构和工作原理简图, 如图 1 所示.

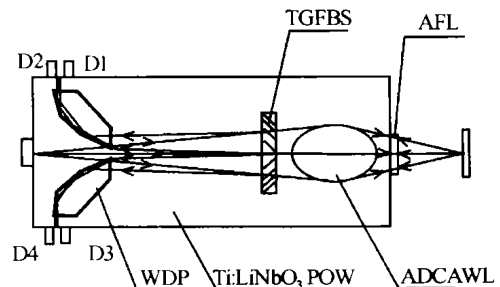


图 1 集成光学光盘读出头的工作原理
Fig. 1 Principle of integrated planar optic disk pickup

2 集成元件的设计

2.1 非球面消球差双凸波导透镜 (ADCAWL)

在光盘读出头中, 会聚透镜的性能直接关系到

* 国家自然科学基金资助项目 (项目编号: 68977025)
Tel: 13820539939 Email: tlende@sina.com
收稿日期: 2003-06-16

在光盘读出头能否高质量的读出光盘信息,因此对会聚透镜的要求是倍率高,有较大的数值孔径. 本文首次提出并设计一种非球面消球差双凸波导透镜,作为光盘读出会聚元件. 由光学理论可知:如果保证物(光源)和象(光盘上的会聚光斑)的轴上点无球差并满足正弦条件,也就是使轴上的物点和象点为一对不晕点,就能校正透镜的球差和慧差,这样得到的透镜的两个折射面均为非球面(二维波导中为柱面),我们称之为不晕透镜. 系统的光学结构如图 2 所示.

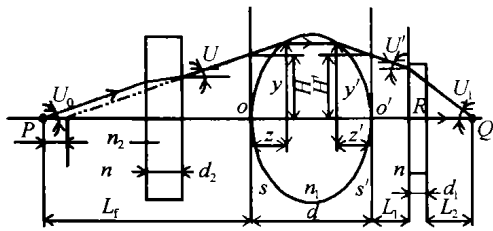


图 2 不晕透镜示意图
Fig. 2 Sketch map of aplanatic lens

P 点为光轴与波导端面的交点,从激光器发出的光即从这点耦合入波导. 波导透镜的(有效)折射率为 n_1 ,在 P 点与波导透镜间有一个厚度为 d_2 (有效)折射率为 n_2 的平行平板,它是由系统中的分束光栅等效得到的,其余区域的(有效)折射率为 n . ΔL 为平行平板对发散角为 U_0 的光线产生的轴上位移, L_f 为 P 点到 S 面极点的距离, d 是两透镜极点间的距离, L_1 是 S' 面极点到 R 的距离, L_2 是光盘读出头的工作距离

令

$$t = \sin U_0, t' = \sin U_1, t/t' = \beta \quad (1)$$

由图 2 得

$$D_y = y' - y \quad D_z = d - z + z' \quad D = \sqrt{D_y^2 + D_z^2} \quad (2)$$

$$y = H - Z \tan U, y' = H' - Z' \tan U' \quad (3)$$

根据不晕成像原理^[7],由折射定律得

$$\frac{dz}{dt} = \left(\frac{ND_z - \cos U}{ND_y - D \sin U} - \tan U \right)^{-1} \left(\frac{dH}{dt} - Z \frac{d}{dt}(\tan U) \right) \quad (4)$$

$$\frac{dz'}{dt'} = - \left(\frac{ND_z - \cos U'}{ND_y - D \sin U'} - \tan U' \right)^{-1} \left(\frac{dH'}{dt'} - Z' \frac{d}{dt'}(\tan U') \right) \quad (5)$$

式中 $N = n_1/n$. 折射面 S,由 $t = \sin U_0 = \sin U$

得

$$\tan U = \frac{t}{\sqrt{1-t^2}} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt}(\tan U) = (1-t^2)^{-3/2} \quad (7)$$

又

$$\Delta L = d_2 \left(1 - \frac{\cos U}{\sqrt{N_z^2 - \sin^2 U}} \right) = d_2 \left[1 - \left(\frac{1-t^2}{N_z^2 - t^2} \right)^{1/2} \right]$$

则有

$$H = (L_f - \Delta L) \tan U = \left\{ Z C_f - d_2 \left[1 - \left(\frac{1-t^2}{N_z^2 - t^2} \right)^{1/2} \right] \right\} \frac{t}{\sqrt{1-t^2}} \quad (8)$$

$$y = H + z \tan U = (L_f - z - \Delta L) \frac{t}{\sqrt{1-t^2}} \quad (9)$$

同样,对 S' 面有

$$y' = H' - Z' \tan U' = (L_1 - Z') t (\beta^2 n^2 - t^2)^{-1/2} + L_2 t (\beta^2 - t^2)^{-1/2} \quad (10)$$

最后,得

$$\frac{dz}{dt} = - \left[\frac{ND_z - D(1-t^2)^{1/2}}{ND_y - Dt} - \frac{t}{\sqrt{1-t^2}} \right]^{-1} \left[(L_f - Z - \Delta L) (1-t^2)^{-3/2} + \frac{d_2 t^2 (N^2 - 1)}{(1-t^2)(N^2 - t^2)^{3/2}} \right] \quad (11)$$

$$\frac{dz'}{dt'} = \left[\frac{D(\beta^2 n^2 - t^2)^{1/2} - ND_y \beta n}{Dt + ND_y \beta n} + t (\beta^2 n^2 - t^2)^{-1/2} \right]^{-1} \left[(L_1 - z') n^2 (\beta^2 n^2 - t^2)^{-3/2} + L_2 (\beta^2 - t^2)^{-3/2} \right] \beta^5 \quad (12)$$

式中 $N = n_1/n, N_2 = n_2/n$.

用四阶龙格-库塔法进行数值求解,得到非球面双凸波导透镜的结构参数如下:

当 $N = N_2 = 1.052, n = 2.035, L_f = 10.7 \text{ mm}, L_1 = 1.33 \text{ mm}, L_2 = 2.0 \text{ mm}, d = 4.0 \text{ mm}, d_2 = 0.04 \text{ mm},$ 孔径 $D = 2.70 \text{ mm},$ 物方孔径角为 $6^\circ,$ 象方孔径角为 $21.92^\circ,$ 物方、象方数值孔径分别为 0.23 和 $0.37.$

由衍射极限的计算公式可求出该光波导透镜的衍射极限

$$\delta = 0.61 \lambda / NA \cdot n \quad (13)$$

式中 λ 为波长, n 为折射率, A 为透镜孔径, NA 为数值孔径. 由式(13)求得工作波长为 $0.635 \mu\text{m}$ 时,该透镜的衍射极限为 $0.475 \mu\text{m}.$

非球面双凸波导透镜的制备是采用图形发生器制作掩膜版后,经过光刻、钛(Ti)扩散和质子交换等光集成工艺来实现的,该制备工艺对于球面波导透镜、非球面波导透镜,制作过程均相同,排除了工艺上的障碍,适合批量生产.

2.2 双光栅会聚光波导透镜(TGFBS)

从光盘 Q 返回并携带光盘信息的光束,由端面耦合进入波导,经 TGFBS 分为两束衍射波,分别聚焦到探测器 D_2, D_1 和 D_4, D_3 上,如图 3 所示.

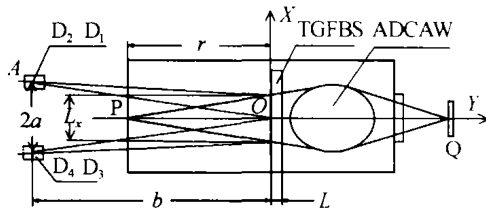


图3 双光栅会聚光波导透镜(TGFBS)示意图

Fig. 3 Sketch map of twin grating focus beam splitter

在 TGFBS 上任取一点 $C(x, y)$, 光源 P 的位置为 $(0, -r)$, 等效探测器的位置是 $(\pm a, b)$; AB 两点是两个探测器的光程等效位置, 通过 C 点的光波, 入射波与衍射波的位相差为

$$\Delta\Phi = \Phi_i - \Phi_d = kN \sqrt{x^2 + (x+y)^2} - kN \sqrt{(x \pm a)^2 + (y+b)^2} \quad (14)$$

式中 Φ_i 与 Φ_d 分别是入射波与衍射波的位相, k 是波数, N 是波导的有效折射率. 对与 y 轴重合的主光线, 入射波与衍射波的位相差为

$$\Delta\Phi' = \Phi'_i - \Phi'_d = (r - \sqrt{a^2 + b^2}) \quad (15)$$

为使导波会聚在 A, B 两点, 应有

$$\Delta\Phi - \Delta\Phi' = 2m\pi; m = 0, 1, 2, \dots$$

光栅第 m 级的条纹方程为

$$\sqrt{x^2 + (y+r)^2} - \sqrt{(x \pm a)^2 + (y+b)^2} = m\lambda/N + r - \sqrt{a^2 + b^2}; m = 0, 1, 2, \dots \quad (16)$$

采用二阶修正的牛顿迭代格式求上式的数值解, 在 $\lambda = 0.78 \mu\text{m}$, $N = 2.2019$, $a = 1.1 \text{ mm}$, $b = 11.0 \text{ mm}$, $r = 10.5 \text{ mm}$, $L = 40.0 \mu\text{m}$ 时, L_x 为 2.16 mm 的范围内, 光栅为渐变倾角的直线型光栅, 共有 620 条直线条纹, 从中心到边缘的周期为 $3.560 \sim 3.402 \mu\text{m}$, 与此对应的条纹与 x 轴正向的夹角为 $-2.855^\circ \sim 2.863^\circ$.

2.3 光波导转向棱镜(WDP)

光波导转向棱镜是在二维波导中应用菲涅耳定律进行设计的, 波导光线由高折射率区入射到低折射率区时, 在一定条件下会发生全反射, 入射的临界角为

$$\theta_0 = \arcsin(N/N_1) \quad (17)$$

式中 $N < N_1$, N 为 Ti:LiNbO_3 扩散平面波导的有效折射率 2.2035, N_1 质子交换区的有效折射率 2.319, $\theta_0 = \arcsin(1/1.052) = 71.9^\circ$ 由于平面波导中的折射率不能做的很大, 并考虑波导制作中折射率的误差因素, 所以每一次全反射之多能使光线偏转 35° . 因此, 波导棱镜由三个反射面使光束实现预定的偏转.

3 器件制作与测试结果

器件在超净室内经过光刻、两次苯甲酸质子交

换、钛 (Ti) 扩散、端面研磨抛光、 SiO_2 溅射, 与光源、探测器、自聚焦透镜混合集成等工艺制作完成, 光栅的掩模版图形与刻制在样片上的图形如图 4(a)、(b) 所示.

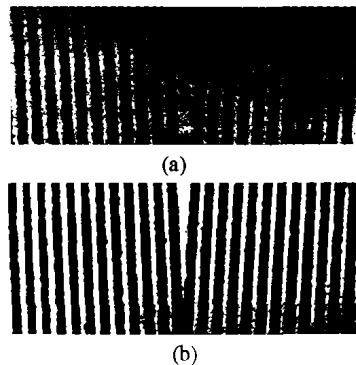


图4 TGFBS的光栅图形

Fig. 4 Light grid sketch of TGFBS

工作时, 半导体激光器 LD 发出的光束, 经端面耦合进入平面光波导, 光波导透镜将光束会聚为一衍射受限光斑, 经波导输出端折射进入自聚焦透镜后会聚于光盘的信息面上. 从光盘返回的光束再次经自聚焦透镜和光波导透镜后, 由双光栅会聚光波导透镜(TGFBS)分束, 光波导转向棱镜转向, 光电探测器 $D1 \sim D4$ 探测, 运算电路处理获得光盘读出信号(readout signal)、聚焦误差信号(focus error)和跟踪误差信号(tracking error). 系统测试原理如图 5 所示.

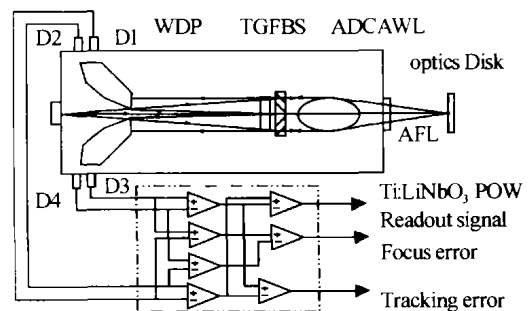


图5 系统测试原理图

Fig. 5 System test schematic

3.1 波导透镜会聚特性的测试

测量的实测焦斑为 $2.735 \mu\text{m}$. 测试用光源为 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 的 He-Ne 激光器, 工作距离 $L = 2 \text{ mm}$, 光束经会聚, 在 3 dB 处测得入射光斑为 $9.809 \mu\text{m}$, 达到设计要求.

3.2 系统测试

配用的光源为小发射角、高强度、高质量的 LD, 其发光面宽度方向尺寸为 $5 \mu\text{m}$, 在 3 dB 处出射光斑为 $0.67 \mu\text{m}$, 可满足光盘使用要求. 光盘读出头光波导透镜聚焦光斑的光强分布曲线, 如图 6 所示.

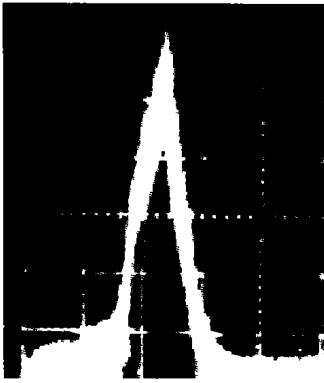


图6 聚焦光斑的光强分布曲线

Fig. 6 Light distribution curve of focus point

4 结论

完成了在铌酸锂基片上对球面消球差双凸波导透镜、双光栅会聚光波导透镜、光波导转向棱镜、平面光波导的单片集成。克服了微透镜组成的分立组件光盘读出头存在的元件个数多、系统结构复杂、加工与装校难度的不足,测试结果达到设计要求,光斑理论值 $0.475 \mu\text{m}$,实测值 $0.67 \mu\text{m}$,对发展、改进光盘读出头提供了有效手段。同时研制了“集成光学光盘读出头”特性参数测量系统,可以快速对该器件性能进行在线测试,为产业化的工艺流程提供必要帮助。

参考文献

- 1 陈才和. 集成光学光盘读出头研究. 光电子·激光, 1993, 4(Z):24~26
Chen C H. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 1993, 4(Z): 24~26
- 2 Ding Guilan, Chen Caihe. Design and fabrication of integrated-optic disk pickup on LiNbO_3 substrate. *Chinese Journal of Lasers B*, 2001, 10(3):203~205
- 3 李楠, 汪莹. 光盘驱动器的核心部件—光学头. LSI 制造与测试, 1993, 14(6):12~16
Li N, Wang Y. *LSI Manufacturing and Test*, 1993, 14(6):12~16
- 4 李明智, 廖常俊. 利用不可擦光盘机实现光磁信号读出. 科学仪器, 1992, 13(3):325~330
Li M Z, Liao C J. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1992, 13(3):325~330
- 5 李应选. 光盘镜头的发展. 光学技术, 1994, 20(4):5~11
Li Y X. *Optical Technique*, 1994, 20(4):5~11
- 6 陈海清, 阮玉. 可擦重写光盘光学头加固方法研究. 华中理工大学学报, 1997, 25(4):1~4
Chen H Q, Ruan Y. *Huazhong Univ of Sci & Tech*, 1997, 25(4):1~4
- 7 Burn M, Wolf E 著, 杨葭荪等译校. 光学原理. 北京: 科学出版社, 1978-1981
Burn M, Wolf E. Yang Jiasun Translation. *Optical Principle*. Beijing: Science Press, 1978~1981
- 8 中国光盘产业推进委员会(DICC). DVD/CD 只读光学头通用技术规范, Q/321100JK14-2002, 2003 年 1 月 8
- 9 Wu M C. Micromachining for optical and optoelectronic systems. *Proc of IEEE*, 1997, 85(11):1833~1856
- 10 Hiroyuki Kawano, Tomohiro Sasagawa. Development of planar optics for an optical tracking sensor. *Jpn J Appl Phys*, 1998, (37):5593~5597
- 11 伊德尔, 严农白, 陆思, 等. 新型 DVD/CD—R 兼容型集成平板光盘头的研究. 光电子·激光, 2002, 13(6):550~553
Yi D R, Yan N B, Lu S, et al. *J Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(6):550~553
- 12 Sun Liqun, Zhang Enyao, Wang Jia, et al. Advances in high density optical data storage based on near-field optical super resolution. *J of Opto-electronics · Laser*, 2001, 12(6):646~652

Study and Fabrication on Integrated Planar Optic Disk Pickup

En De, Chen Caihe, Cui Yuming, Ding Guilan, Liu Jie

College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science(Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072

Received date:2003-06-16

Abstract An integrated optic disk pickup has been studied and fabricated. The device is realized by an aplanatic double-convex aspherical waveguide lens (ADCAWL), a twin grating focus beam splitter (TGFBS), and two waveguide deflecting prisms (WDP), which are monolithic integrated on a LiNbO_3 chip. It is not only free from the disadvantages of a micro-lens disk pickup: big bulk and complex assembly, but also improves reliability of the system and realizes integration of the disk pickup. The theoretical spot size is $0.475 \mu\text{m}$, the measured $0.67 \mu\text{m}$.

Keywords Integrated optic disk pickup; Aplanatic double-convex aspherical waveguide lens; Twin grating focus beam splitter; Waveguide deflecting prisms

En De was born in 1962, Inner Mongolia Autonomous region, Mongolian, Tianjin University Doctor graduate student. His research interests are in the field of integrated optics, optic communication and optic fibre sensor.

