

文章编号 1004-924X(2009)07-1497-05

# 基于精密刻划及薄膜沉积技术的光盘分束光栅研制

吴娜<sup>1,2</sup>, 张善文<sup>1,2</sup>, 宋可平<sup>3</sup>, 巴音贺希格<sup>1</sup>, 齐向东<sup>1</sup>, 高键翔<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 清华大学精密仪器与机械学院, 北京 100034)

**摘要:**给出了采用光栅刻划和镀膜技术相结合研制光盘分束光栅的方法。采用光栅刻划机在金属膜上刻制占宽比为0.5的黑白光栅,并由黑白光栅翻制出制作光盘分束光栅的掩模版。通过掩模版对涂覆在K9玻璃基底上的光刻胶实施曝光和显影形成光刻胶矩形浮雕光栅,在理论设计的误差允许范围内,对此浮雕光栅沉积SiO<sub>2</sub>薄膜,去除残余光刻胶后得到SiO<sub>2</sub>矩形光栅母版,再经复制工艺制作了环氧树脂光盘分束光栅。测试结果表明,利用光盘分束光栅的纵向和横向加工误差的互补性,可以将光栅辅助光束与读写主光束强度之比的误差控制在±0.03之内。

**关键词:**光学头;分束光栅;精密刻划;镀膜技术;加工工艺

**中图分类号:**O 436.1;TN305.7 **文献标识码:**A

## Manufacture for light splitting grating in optical disk based on precision ruling and thin film deposition

WU Na<sup>1,2</sup>, ZHANG Shan-wen<sup>1,2</sup>, SONG Ke-ping<sup>3</sup>, Bayanheshig<sup>1</sup>, QI Xiang-dong<sup>1</sup>, GAO Jian-xiang<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract:** A manufacturing method for a light splitting grating based on precision ruling and thin film deposition technologies was presented. The black-white grating with a duty cycle of 0.5 was ruled by a ruling machine on the metal film, then, it was fabricated into a mask for the light splitting grating. After exposing and developing photoresist on the K9 glass behind the mask, the rectangle relief grating consisting of photoresists was formed. In the range of theory design error, a SiO<sub>2</sub> rectangle grating master could be obtained after SiO<sub>2</sub> film was deposited on the relief grating and the rest photoresists were removed. Finally, an epoxide resin light splitting grating was duplicated successfully. The experimental results show that the error of the intensity ratio of secondary light beam to read-write main light beam can be controlled in ±0.03 by using the complementarity of the mismatching tolerance between lengthwise direction and cross direction of the light splitting grating.

**Key words:** optical pick-up head; light splitting grating; precision ruling; thin film deposition technology; manufacturing technology

收稿日期:2008-12-16;修订日期:2009-02-06.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 60478034);“十一五”国家科技支撑计划重大项目(No. 2006BAK03A02);国家创新方法工作专项项目(No. 2008IM040700);国家重大科研装备研制项目(No. ZBYZ2008-1);中国科学院重大科研装备研制项目(No. YZ200804);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20070523, No. 20086013)

## 1 引言

光学头是通过矩形光盘分束光栅来实现探测、循迹、写入和读出信号的。一直以来,日本和欧美的一些 VCD 机、DVD 机和 CD-ROM 及其元器件的主要生产厂家对全球光学头及光盘分束光栅的市场进行着技术垄断,我国光学头光栅还基本依赖进口。近几年,国内研究人员加大了对光学头的关注,目的是尽快拿出具有自主知识产权的成果。例如,梁万国等<sup>[1-2]</sup>结合国际前沿动态<sup>[3-4]</sup>对光盘信号的探测、聚焦和循迹原理做过较为详细的介绍,也尝试过样品光栅的研制<sup>[1]</sup>;张海涛等<sup>[5-6]</sup>则专门从理论角度较为深入地做过光学头光栅侧壁陡直度的误差分析和光栅表面粗糙度分析;文献<sup>[7-9]</sup>也曾报道过相关研究工作的进展情况。这些工作对光学头光栅的研制都有重要的理论指导意义。

制作矩形光栅需要有掩模版。掩模版的制作一般采用光束或电子束图形发生器对涂有光刻胶和铬层的基片表面曝光,再经显影、去铬和去除残余光刻胶等手段得到铬版。制作矩形光栅通常采用先通过掩模板制作浮雕型光刻胶光栅,然后再用离子束刻蚀的方法将浮雕型光刻胶光栅图形二次转移到基片上。本文则选择了另外一种方法,即根据长春光机所在光栅刻划<sup>[10]</sup>和镀膜技术方面具备的优势,尝试采用光栅刻划机在金属膜上刻制占宽比为 0.5 的黑白光栅,并由黑白光栅翻制出制作光盘分束光栅的掩模版。通过掩模版对涂覆在 K9 玻璃基底上的光刻胶实施曝光和显影形成光刻胶矩形浮雕光栅<sup>[11]</sup>,并在理论设计的误差允许范围内,对此浮雕光栅沉积 SiO<sub>2</sub> 薄膜,去除残余光刻胶后得到 SiO<sub>2</sub> 矩形光栅母版,再经复制工艺制作环氧树脂光盘分束光栅。

## 2 理论设计

光学头光栅是一种矩形位相光栅,要求占宽比为 0.5,其目的在于实现偶数级次衍射光强度为 0,因为光学头是利用 0 级(主光束)读写信息,±1 级(辅助光束)检验跟踪误差信号。其次,光学头光栅是利用 0 级和±1 级衍射波协同作用来实现其读写功能,它不追求±1 级衍射效率的最

大值,而是需要 0 级和±1 级同步达到互相匹配的衍射效率,这就需要根据整个读写系统对±1 级和 0 级衍射波的光强比例要求来设计槽深。

矩形光栅截面如图 1 所示,光栅周期为  $d$ ,槽宽为  $\tau$ ,占宽比为  $\rho = \tau/d$ ,刻槽深度为  $h$ ,基底厚度为  $H$ ,光栅材料折射率为  $n$ 。

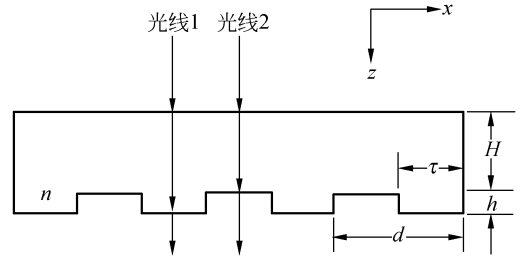


图 1 矩形光栅

Fig. 1 Plot of rectangular grating

经一番冗长的推导过程<sup>[8-9]</sup>得到垂直入射下辅助光束与读写主光束强度之比为:

$$\eta_{\pm 1,0} = \frac{\eta_{\pm 1}}{\eta_0} = \frac{1(1 - \cos 2\pi\rho)(1 - \cos \Delta\phi_0)}{\pi^2 1 - 2\rho(1 - \rho)(1 - \cos \Delta\phi_0)}, \quad (1)$$

透过率可表示为(设入射光强度为 1):

$$\eta_{\text{eff}} = \eta_{-1} + \eta_0 + \eta_{+1} = \frac{1 - 2\rho(1 - \rho)(1 - \cos \Delta\phi_0) + 2(1 - \cos 2\pi\rho)(1 - \cos \Delta\phi_0)/\pi^2}{1 - 2\rho(1 - \rho)(1 - \cos \Delta\phi_0)}, \quad (2)$$

其中,  $\Delta\phi_0$  表示光束通过光栅齿和槽(对应光线 1 和 2)的相位差:

$$\Delta\phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)h. \quad (3)$$

表 1 中设计值的前 3 项为数值计算中将用到的某种产品的技术指标,第 4 项为 VCD 光学头光栅没有横向误差时的理论设计值,工作波长为 780 nm,为了便于复制,本文把光栅材料选为环氧树脂( $n=1.567$ )。

表 1 光栅参数的理论设计值和实验值

Tab. 1 Design and experiment values of grating parameters

	$\eta_{\pm 1,0}$	$\eta_{\text{eff}}$	$\rho$	$h/\text{nm}$
设计值	$0.253 \pm 0.03$	$\geq 0.87$	$0.5 \pm 0.05$	293
实验值	0.252	0.912	0.51	296.74

如果在式(1)中设  $\eta_{\pm 1,0} = 0.253$ ,占宽比  $\rho = 0.5$ ,由此可得刻槽深度  $h = 293 \text{ nm}$ 。由式(1)求

刻槽深度,实际上是一个求函数 0 点的数学问题,可以把所要求的函数设为  $F(h)$ ,它以刻槽深度  $h$  为自变量,考虑到  $\Delta\eta_{\pm 1,0} = \pm 0.03$ ,经计算可知刻

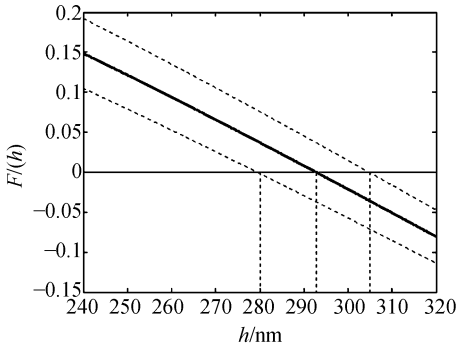


图 2 函数零点分布及刻槽深度

Fig. 2 Zero distribution of function and groove depth

槽深度的允许范围为 280~305 nm,如图 2 所示。显然,这属于常见的设计方法。但是,后面将要谈到的矩形光栅纵向和横向加工误差的互补性表明,由于光栅不可避免地存在横向误差,因而光栅槽深必须  $>293$  nm。

因存在加工误差,实际的刻槽深度和占宽比分别为  $h + \delta_h$  和  $\rho + \delta_\rho$ ,  $\delta_h$  和  $\delta_\rho$  分别称为纵向加工误差和横向加工误差,故式(3)和式(2)变为:

$$\Delta\phi_{0\delta} = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)(h + \delta_h), \quad (4)$$

$$\eta_{\pm 1,0} = \frac{1}{\pi^2} \frac{(1 + \cos 2\pi\delta_\rho)(1 - \cos \Delta\phi_{0\delta})}{1 - (0.5 - 2\delta_\rho^2)(1 - \cos \Delta\phi_{0\delta})}, \quad (5)$$

对式(5)数值求根的结果如图 3 所示。

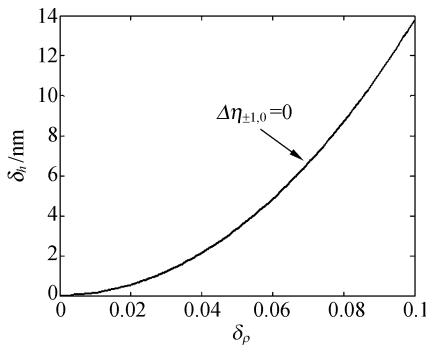


图 3 纵向和横向加工误差的互补关系

Fig. 3 Compensability between longitudinal error and transverse error in manufacture

图 3 表明,在纵向加工误差和横向加工误差同时存在的情况下,可以通过增加刻槽深度(即  $h + \delta_h > h$ )来补偿横向加工误差的影响,即可以通

过纵向和横向加工误差的互补来实现辅助光束与读写主光束强度之比的无偏差,即  $\Delta\eta_{\pm 1,0} = 0$ ,亦即保持  $\eta_{\pm 1,0} = 0.253$  不变,不妨称此为光学头分束光栅纵向和横向加工误差的互补性<sup>[8-9]</sup>。由此可知,占宽比偏离 0.5 对辅助光束与读写主光束强度之比  $\eta_{\pm 1,0}$  所带来的影响可以用增加刻槽深度予以校正,例如通过增加刻槽深度 14 nm 可以补偿 20% 的占宽比误差。可见,光学头分束光栅纵向和横向加工误差的互补性对制作工艺是很有用的。

图 4 为由式(2)得到的纵向和横向加工误差与透过率关系的三维图,无加工误差时的透过率为 0.927。由图看出,两种误差对透过率都有影响。因此,尽管可以用增加刻槽深度的方法来校正占宽比偏离 0.5 对辅助光束与读写主光束强度之比  $\eta_{\pm 1,0}$  所带来的影响,这却要以损失部分透过率  $\eta_{\text{eff}}$  为代价。不过,根据表 1 数据,图 4 所确定的误差范围已能够满足光学头光栅对透过率的要求,尤其把横向加工误差  $\delta_\rho$  控制在 0.05 之内时,两种加工误差对透过率的影响程度是可以接受的。

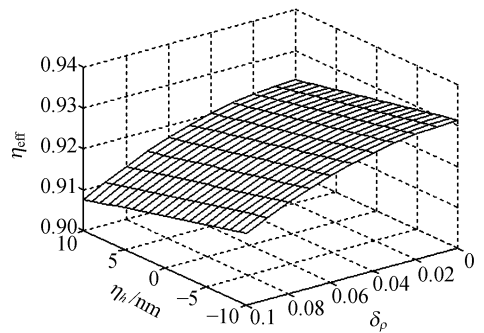


图 4 纵向和横向加工误差对透过率的影响

Fig. 4 Effect of longitudinal error and transverse error on transmittance in manufacture

### 3 研制技术

根据上述理论设计,采用光栅刻划机在金属镍膜上刻制占宽比为 0.5 的黑白光栅→翻制成耐磨性较好的金属铬光栅掩模版→对涂覆在 K9 玻璃基底上的光刻胶实施曝光显影→沉积  $\text{SiO}_2$  薄膜→去除残余光刻胶获得  $\text{SiO}_2$  光栅母版→复制为环氧树脂光栅等工艺过程研制出了面积为 150

mm×150 mm,刻线密度为 24 l/mm 的 VCD 信号读写头光栅样品。

第一,金刚石刻刀研磨及铈版黑白光栅刻划。首先,刻线密度为 24 l/mm、占宽比为 0.5 的黑白光栅,要求使用刃宽为 20.833 μm 的平刃刻划刀,而且刃宽误差要小,做到 0.4 μm 以下。其次,刻划黑白光栅是去屑过程,而且要求去屑彻底,不留残余铈膜,黑白分界线光滑整齐。经过试刻、调整和再试刻等过程,符合要求后即可正式刻划,经过约 10 h 刻划出 150 mm×150 mm 的铈版黑白光栅。

第二,掩模版的翻制。铈是一种韧性非常好的金属,缺点是耐磨性差。为了克服这种不足,将铈版黑白光栅翻制成耐磨性较好的铬版。

第三, SiO<sub>2</sub> 矩形光栅母版制作。用铬版黑白光栅作为掩模版,对涂覆在 K9 玻璃基底上的光刻胶曝光。显影后,在 K9 玻璃基底上形成具有光刻胶栅线的矩形光栅,且刻槽深度要大于实际要求的光栅槽形。然后,蒸镀 SiO<sub>2</sub> 薄膜,并精确控制膜层的厚度,使之与理论计算所要求的光栅刻槽深度吻合,如图 5(a)所示。去除残余光刻胶后保留基底上的 SiO<sub>2</sub>,这样就制成了具有 SiO<sub>2</sub> 栅线的矩形光栅母版,如图 5(b)所示。

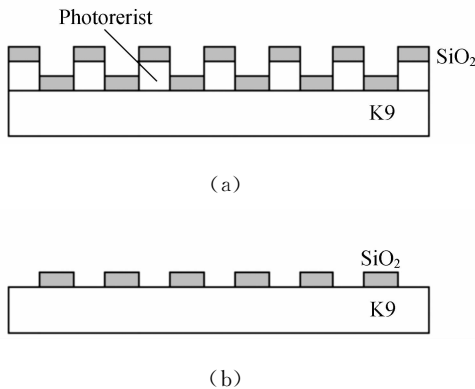


图 5 母版光栅的形成

Fig. 5 Formation of grating master

第四,采用光栅复制技术由 SiO<sub>2</sub> 母版光栅复制出环氧树脂 VCD 光盘分束光栅,其原子力显微镜三维形貌如图 6 所示。测得光栅常数为 41.571 μm,其它参数见表 1。

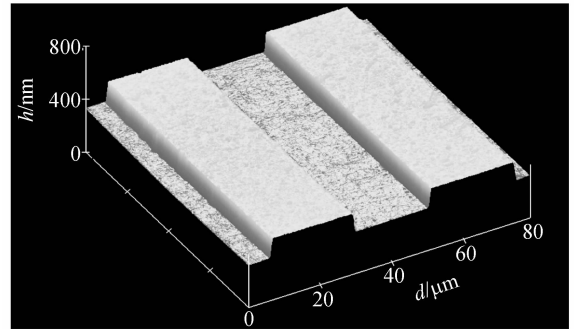


图 6 样品光栅的原子力显微镜三维形貌图

Fig. 6 Three dimension AFM profilogram of pattern grating

## 4 结 论

通过适当增加刻槽深度可以弥补横向加工误差所造成的辅助光束与读写主光束强度之比偏离设计值,即光学头光栅纵向和横向加工误差之间存在互补性,而这种互补会损失部分透过率。但是,对光学头光栅而言,损失部分透过率的代价是可以接受的。重要的是不易避免的占宽比偏差(横向误差)可以通过加大光栅刻槽深度予以补偿,这一结论对简化工艺过程有着明确的理论指导意义。

由光栅刻划机制作的掩模版也可以达到较高的精度,难度在于金刚石平刃刻划刀的研磨,要求技术人员具有丰富的经验积累。将 SiO<sub>2</sub> 薄膜的厚度误差控制在十几个纳米可行,它要比由离子束刻蚀控制光栅槽深容易一些,可以作为制作矩形光栅的参考方法之一。

## 参考文献:

- [1] 梁万国,郑婉华,谢敬辉,等. VCD 和 DVD 用全息光栅衍射效率的分析[J]. 半导体学报, 2001, 22(6):784-787.  
LIANG W G, ZHENG W H, XIE J H, et al.. Analysis of diffraction efficiency of the holographic

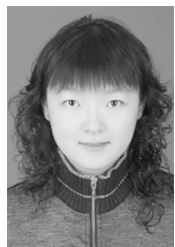
optical elements in VCD and DVD [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(6):784-787. (in Chinese)

- [2] 刘守渔,梁万国,郑婉华,等. 全息光栅元件在光学读出头中的应用[J]. 激光杂志, 2001, 22(3):28-30.

LIU SH Y, LIANG W G, ZHENG W H, et al..

- Application of the holographic optical elements to the optical pick-up heads[J]. *Laser Journal*, 2001, 22(3):28-30. (in Chinese)
- [3] NAOKI F, MOTOHIKO Y. Si-OEIC (OPIC) for optical pickup [J]. *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, 1997, 43(2):157-164.
- [4] AKIO Y, HIDEYUKI N. Laser-detector-hologram unit for thin optical pick-up head of a CD player [J]. *IEEE Transaction on Components, Packing, and Manufacturing Technology*, 1995, 18(2):245-249.
- [5] 张海涛, 巩马理, 赵达尊, 等. DVD 光学头中的梯形光栅设计和表面粗糙度分析[J]. *光学技术*, 2001, 27(3):217-219.  
ZHANG H T, GONG M L, ZHAO D Z, *et al.*. Design and roughness analysis of trapeziform grating in DVD optical head[J]. *Optical Technique*, 2001, 27(3):217-219. (in Chinese)
- [6] 张海涛, 巩马理, 赵达尊, 等. 高密度光盘存储中的梯形光栅设计和误差分析[J]. *光学学报*, 2002, 22(1):92-98.  
ZHANG H T, GONG M L, ZHAO D Z, *et al.*. Design and error analysis of trapeziform grating for high density optical disk storage[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(1):92-98. (in Chinese)
- [7] 巴音贺希格, 齐向东, 唐玉国. 矩形光栅衍射效率的一般表达式及其缺级现象[J]. *光电子·激光*, 2003, 14(10):1021-1024.  
BAYANHESHIG, QI X D, TANG Y G. The general formula to the diffraction efficiency of rectangular grating and its phenomenon of missing orders [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(10):1021-1024. (in Chinese)
- [8] BAYANHESHIG, QI X D, LI W H, *et al.*. The compensability between the longitudinal and transverse error of grating in the optical pick-up head [J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(5):249-252.
- [9] 徐福全, 巴音贺希格. 光盘读写头光栅纵向和横向加工误差数值分析[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(2):132-135, 139.  
XU F Q, BAYANHESHIG. The numerical analysis for the longitudinal and transverse error of grating in the optical pick-up head[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(2):132-135, 139. (in Chinese)
- [10] 巴音贺希格, 高键翔, 齐向东. 机械刻划长焦距凹面金属光栅的研制[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3):391-395.  
BAYANHESHIG, GAO J X, QI X D. Manufacture for ruling concave metal grating with a long focal length [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):391-395.
- [11] 巴音贺希格, 张浩泰, 李文昊. 凹球面基底离心式涂胶的数学模型及实验验证[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2):229-234.  
BAYANHESHIG, ZHANG H T, LI W H. Mathematic model and experiment verification of spin coating on concave spherical substrate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):229-234. (in Chinese)

#### 作者简介:



吴娜(1983—),女,吉林长春人,硕士研究生,研究实习员,主要从事光栅测试技术的研究。E-mail: snoopywool8@hotmail.com

张善文(1980—),男,吉林通化人,博士研究生,主要从事光栅积分理论及光栅刻划工艺的研究。E-mail: zhshwen007@sina.com

宋可平(1988—),男,吉林长春人,本科生,测控技术与仪器专业。E-mail: songkp@tsinghuce.edu.cn

齐向东(1965—),男,吉林辽源人,研究员,主要从事光栅刻划机研究及衍射光栅的研制。E-mail: chinagrating@263.net

高键翔(1965—),男,吉林长春人,高级工程师,主要从事光栅刻划工艺的研究。E-mail: gaojx@ciomp.ac.cn

#### 导师简介:

巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,理学博士,研究员,博士生导师,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术的研究。E-mail: bayin888@sina.com