

文章编号: 0258-7025(2001)11-0994-05

# CD-R 光盘盘基槽深和槽宽均匀性 测试方法研究\*

徐文东 于福熹 施宏仁 何红林 强  
(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**摘要** 介绍了一种利用衍射方法测试 CD-R 光盘盘基槽深和槽宽均匀性的方法。CD-R 光盘盘基槽深和槽宽均匀性的测试对于 CD-R 光盘的制造非常重要,它可反映出母盘涂胶、刻录、显影、金属化、电铸及盘基复制的质量。尽管它不能精确测试沟槽的形状,但在测试均匀性时却显得简单、可靠、灵敏、快速和无损。同时给出同一盘基用衍射方法和原子力显微镜方法的测试结果。

**关键词** CD-R 光盘盘基, 沟槽, 光栅, 衍射方法

**中图分类号** TP 333.4\*3 **文献标识码** A

## Measurement for Uniformity of Groove Depth and Width of CD-R Optical Disc Substrates

XU Wen-dong GAN Fu-xi SHI Hong-ren HE Hong LIN Qiang

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

**Abstract** In this paper, a testing system for groove geometry of CD-R substrates by measuring diffraction orders is introduced. This testing is of particular importance in CD-R disc manufacture process because the results fed back from the testing can be used to help optimize recording, developing, metalizing, electroplating and replicating processes. Even if the width and depth of groove are not accurately obtained by this system, it is also valuable in CD-R disc manufacturing process because the system, which can be used to judge the quality of substrates, is simple, sensitive, quick and non-destructive. The results of a same sample tested by our system and an AFM microscope are presented simultaneously.

**Key words** CD-R optical disc substrates, groove, grating, diffraction order measurement

### 1 引言

CD-R 光盘的质量很大程度上取决于其盘基的质量,包括盘基沟槽的大小及其在整个盘基上变化的程度。不同的记录介质,其盘基沟槽的深度和宽度是不同的;CD-R 光盘盘基沟槽是产生推挽信号、过道信号、ATIP 信号(电机控制时钟、地址及纪录最佳功率)的来源<sup>[1]</sup>,因此盘基沟槽深度和宽度任何过大的变化必将导致 CD-R 光盘读写性能的下降。CD-R 光盘盘基是经过母盘涂胶、刻录、显影、金属化、电铸及盘基复制等几个过程之后制作出来的。

为使 CD-R 光盘达到国际标准,必须严格监测和控制这几个过程。这样,实时在线地测试沟槽的深度和宽度,特别是其在整个盘面上的变化就显得非常重要了。

快速无损是实时在线测试仪器的基本要求,为此我们提出了 CD-R 光盘盘基沟槽形貌均匀性测试的衍射方法。CD-R 光盘盘基类似一个位相光栅,当光束通过光盘盘基有沟槽的区域时(或经光盘盘基有沟槽的区域反射时)将发生衍射(如图 1 所示),通过测量 0 级,1 级,2 级衍射光强的大小并进行计算可以求出光盘盘基槽深和槽宽来,通过盘基的转动和径向移动就可给出光盘盘基整个表面上槽深和槽宽的变化。该方法实现起来较简单、可靠,灵敏度较高,更换样品时无须调整,并在较大抽样范围内给出槽深槽宽平均值,因此测试速度快,并且结果直

\* 国家重点科技项目(攻关)计划子专题(编号:85-710-03-01-4)资助项目。

收稿日期:2000-06-13;收到修改稿日期:2000-10-10

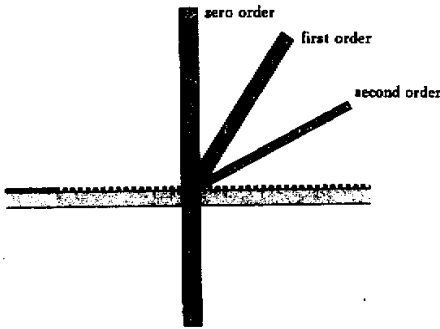


图 1 CD-R 光盘盘基槽深槽宽衍射测试原理图  
(-1 级, -2 级等未画)

Fig.1 Principle of the testing system for groove geometry of CD-R substrates

观,属非破坏性测试,是实时在线测试的理想选择。该方法可直接用于玻璃母盘的显影设备中,以精确控制显影过程的进行,并可准确评价显影后的玻璃母盘、镍母盘(压模)、复制后的光盘盘基及成品盘的沟槽质量。理论上讲,该方法还可给出槽间距的变化、盘面的翘曲,并可检测尘埃或沟槽的局部缺陷<sup>[2]</sup>;不仅可透射式地测试显影后的玻璃母盘和复制后的光盘盘基,也可反射式地检测压模和成品盘(但实现起来较困难,较少采用)。

## 2 原理

实际情况中,光束为会聚的激光光束,在束腰处,光可以看作单色平面波,但尺寸有限,且光强分布不均匀,为高斯函数,这是激光单横模输出的特征,现设为  $g(x_0, y_0)$  ( $x_0, y_0$  位于光盘盘基有沟槽的表面)。CD-R 光盘盘基的沟槽在盘面上呈螺旋线型,但在激光照射的区域内(直径约 200  $\mu\text{m}$ )可以近似看成直线型。尽管 CD-R 光盘基片的沟槽还有附加的摆动,但由于幅度很小( $\pm 30 \text{ nm}$ ),这里完全可以忽略。为使问题简化,可将剖面槽形看成矩形(只需槽深和槽宽两个参数就可描述),当光束垂直入射后,其位相分布如图 2 所示,  $\phi_1, \phi_2$  对应于台阶面和沟槽底的位相( $\phi_2 - \phi_1 = 2\pi(n-1)d/\lambda$ ,  $n$  为盘基折射率,  $d$  为槽深,  $\lambda$  为光波长),  $w$  为槽宽,  $p$  为沟槽间距。也就是说,CD-R 光盘可以看成一个大矩形位相光栅,其复振幅透过率可以表示为

$$t(x_0, y_0) = \left[ (e^{i\phi_2} - e^{i\phi_1}) \text{rect} \left( \frac{x_0}{w} \right) \times \frac{1}{p} \text{comb} \left( \frac{x_0}{p} \right) + e^{i\phi_1} \right] \quad (1)$$

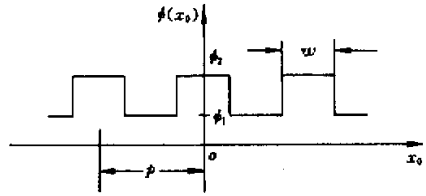


图 2 平行激光束通过有槽盘基时的透射波前  
Fig.2 Transmission wave front when a parallel laser beam passes through the substrate with grooves

光经过光栅后的复振幅分布为

$$u(x_0, y_0) = \left[ (e^{i\phi_2} - e^{i\phi_1}) \text{rect} \left( \frac{x_0}{w} \right) \times \frac{1}{p} \text{comb} \left( \frac{x_0}{p} \right) + e^{i\phi_1} \right] g(x_0, y_0) \quad (2)$$

利用傅里叶变换的卷积定理,光束通过后的夫朗和费衍射图样的复振幅分布为

$$U(x, y) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp \left[ j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2) \right] \left[ (e^{i\phi_2} - e^{i\phi_1}) w \text{sinc}(wf_x) \text{comb}(pf_x) \delta(f_y) + e^{i\phi_1} \delta(f_x, f_y) \right] \times G(f_x, f_y) \quad (3)$$

$G(f_x, f_y)$  为  $g(x_0, y_0)$  的傅里叶变换,  $x, y$  位于探测器表面,此时  $f_x = x/(\lambda z), f_y = y/(\lambda z)$ ,将其代入后

$$U(x, y) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp \left[ j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2) \right] \times \left[ (e^{i\phi_2} - e^{i\phi_1}) \frac{w}{p} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc} \left( \frac{wn}{p} \right) \delta \left( \frac{x}{\lambda z} - \frac{n}{p}, \frac{y}{\lambda z} \right) + e^{i\phi_1} \delta \left( \frac{x}{\lambda z}, \frac{y}{\lambda z} \right) \right] \times G \left( \frac{x}{\lambda z}, \frac{y}{\lambda z} \right) \quad (4)$$

在  $x = 0$  附近,即 0 级衍射为

$$U(x, y) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp \left[ j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2) \right] \times \left[ (e^{i\phi_2} - e^{i\phi_1}) \frac{w}{p} + e^{i\phi_1} \right] G \left( \frac{x}{\lambda z}, \frac{y}{\lambda z} \right) = U_0(x, y) \quad (5)$$

在  $x/(\lambda z) = n/p$  附近,即  $n$  级衍射为( $n \neq 0$ )

$$U(x, y) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp \left[ j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2) \right] \times \left[ (e^{i\phi_2} - e^{i\phi_1}) \frac{w}{p} \text{sinc} \left( \frac{nw}{p} \right) \right] \times G \left( \frac{x}{\lambda z} - \frac{n}{p}, \frac{y}{\lambda z} \right) = U_n(x, y) \quad (6)$$

光强则分别表示为

$$I_0 = |U_0(x, y)|^2 = \frac{1}{\lambda^2 z^2} \times$$

$$\left| \frac{w}{p} e^{i\phi_2} + \left(1 - \frac{w}{p}\right) e^{i\phi_1} \right|^2 G^2 \left( \frac{x}{\lambda z}, \frac{y}{\lambda z} \right) \quad (7)$$

$$I_n = |U_n(x, y)|^2 = \frac{2}{\lambda^2 z^2} [1 - \cos(\phi_2 - \phi_1)] \times \frac{w^2}{p^2} \text{sinc}^2 \left( \frac{\pi w}{p} \right) G^2 \left( \frac{x}{\lambda z}, \frac{y}{\lambda z} \right) \quad (8)$$

在实际装置中,我们测的是探测器接收面上的光功率,即对式(7)和(8)在接收面上进行积分

$$P_0 = \int_{D_0} I_0 dx dy = \frac{1}{\lambda^2 z^2} \left| \frac{w}{p} e^{i\phi_2} + \left(1 - \frac{w}{p}\right) e^{i\phi_1} \right|^2 \int_{D_0} G^2 \left( \frac{x}{\lambda z}, \frac{y}{\lambda z} \right) dx dy \quad (9)$$

$$P_n = \int_{D_n} I_n dx dy = \frac{2}{\lambda^2 z^2} [1 - \cos(\phi_2 - \phi_1)] \times \frac{w^2}{p^2} \text{sinc}^2 \left( \frac{\pi w}{p} \right) \int_{D_n} G^2 \left( \frac{x}{\lambda z}, \frac{y}{\lambda z} \right) dx dy \quad (10)$$

式中,  $D_0, D_n$  表示探测器接收面的范围,如果各探测器接收面完全相同,与被测区域的距离  $z$  一样,中心与相应的  $G^2$  中心重合的话,那么  $P_0, P_n$  表达式后面的积分值就相同。

### 3 讨 论

1) 从上面的推导过程,可看出  $\phi_2 - \phi_1$  的正负根本不影各级的光强,也就是说,我们无法确定所测的  $w$  是台阶面的宽度还是沟槽底的宽度。

2) 当  $\phi_2 - \phi_1 = 0$  时(即为平面时),除零级外,其他各级均为 0,即不产生衍射;换言之,  $\phi_2 - \phi_1$  的存在,导致了总功率的重新分配,零级的部分功率被其他各衍射级所分享,其相对于零级的变化(如  $I_1/I_0$ ) 反映了  $\phi_2 - \phi_1$  变化。另一方面,当  $w/p = 1$  或 0 时(即为平面时),除零级外,其他各级均为 0,也不产生衍射,也就是说,  $w/p \neq 1$  或 0 也是导致功率重新分配的因素。因此,  $I_1/I_0$  的变化反映了  $\phi_2 - \phi_1$  和  $w/p$  综合影响,或粗略地说,就是  $(\phi_2 - \phi_1)(w/p)$  的变化,考虑二维或三维情况,就是沟槽截面积或体积的变化。这就是为什么  $I_1/I_0$  可以作为控制玻璃母盘显影过程的直接参数的理由了。除零级外,其他各级的强弱受到了唯一的  $\text{sinc}^2(\pi w/p)$  函数的调制,因此两级间的比值(如  $I_2/I_1$ ) 反映了  $w/p$  的大小。

3) 沟槽间距  $p$  的变化除影响各级光强外,还反映在各衍射级的空间位置上,例如,1 级衍射位于  $x = \lambda z/p$  处,因此该方法还可测槽间距的变化。

4) 根据以上几条讨论,我们可以先测  $p$ , 然后根据  $I_2/I_1 = \cot^2(2\pi w/p)$  求出  $w$ , 再根据  $I_1/I_0$  求出  $\phi_2 - \phi_1$  来。

上面的推导是利用光传播的标量理论,在理想情况下进行的,即:1) CD-R 光盘盘基在光照射的区域内近似为一维位相光栅;2) 各探测器接受面面积相等,与被测区域的距离一样并且中心与相应的中心重合且形状相同;3) 光束垂直入射;4) 沟槽形貌为矩形。CD-R 光盘盘基在光照射的区域内近似为一维位相光栅的情况上面已经讨论过,同时在以上的推导过程中,实际隐含了这样的假设,即光束照射的区域内,  $\phi_2 - \phi_1, w$  和  $p$  处处不变,这是不能保证严格满足的,实际测的是光束照射区域内平均的  $\phi_2 - \phi_1, w$  和  $p$ , 缩小照射区域,参与平均的沟槽道数就少,仪器所提供的信息就更具有代表性,但过小的照射区域(相当于光栅尺寸有限)将导致衍射斑点(在探测面上)的扩大,衍射级难以分开(其情况类似于光栅的分辨率)。实验证明,  $< 200 \mu\text{m}$  的光斑完全可以满足要求。在测试过程中,只要能将 0 级,1 级,2 级光能尽可能收集到探测器的接收面上就基本满足了第二个理想条件(我们采用了前置汇聚透镜的办法)。为了使  $\phi_2 - \phi_1$  不至于太小而导致第 2 级衍射无法精确探测,也为了便于光路布置,光束通常是以一定角度入射的,当然这样使  $p$  变小(注意,  $w/p$  不变),使衍射角度增大,公式也需相应地修正<sup>[2]</sup>。另外将 CD-R 沟槽看成矩形是有问题的,实际的情形大多是等腰梯形,不能仅由槽深和槽宽两个参数来表示(我们所测的槽宽可以看成上部到下部的平均槽宽)。激光器的偏振态也影响测量的灵敏度,这不能由标量衍射理论所解释,实际上,偏振方向与沟槽平行时灵敏度最高。

### 4 实验装置

实验装置见图 3, 半导体激光(波长 650 nm, 当测量 DVD-R 时, 由于  $d$  和  $p$  都很小, 需要用短波长激光解决  $\phi_2 - \phi_1 = 2\pi(n-1)d/\lambda$  过小, 衍射角又过大的缺点)经准直后入射到会聚透镜上, 会聚透镜将光束会聚成  $< 200 \mu\text{m}$  的光斑, 经反射后照射在 CD-R 盘基的有槽面上, 衍射后的 0 级, 1 级, 2 级光分别由三个探测器接受。为避免外界光的干扰和电路噪声的影响, 半导体激光输出功率被直接调制, 探测器后接锁相放大器。0 级, 1 级, 2 级光的信号以及光盘的转动和径向移动由计算机经接口板采集和

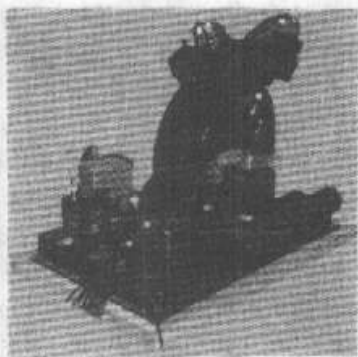


图3 CD-R 盘基槽形测试系统(光学系统部分)

Fig.3 Testing system for groove geometry of CD-R substrate (optical subsystem)

控制,激光调制脉冲信号及锁相放大器的参考信号也是由计算机通过接口板发出的。该装置的主要特点是:光盘转动和径向移动的全部运动都采用滚珠式的,它的特点是精度较高,摩擦小,寿命长,可靠性

好,成本低廉;旋转电机采用步进电机并由细分电路驱动,开环定位的分辨率高、稳定性好,并降低了成本。主要技术指标为:激光器波长:650 nm。调制频率:50 kHz。A/D 采样位数:12 位;最高采样频率:40 kHz。扫描分辨率:切向最高可达 5.08 万步/圈,径向  $2.5 \mu\text{m}/\text{步}$ 。测量时间:当切向 2500 步/圈 ( $< 150 \mu\text{m}/\text{步}$ ),径向  $100 \mu\text{m}/\text{步}$  时:测量时间为 6 min 左右。当切向 1250 步/圈 ( $300 \mu\text{m}/\text{步}$ ),径向  $200 \mu\text{m}/\text{步}$  时:测量时间为 2 min 左右。

## 5 测试结果与误差分析

图 4 给出一变宽度和深度 CD-R 光盘盘基的深度变化俯视图(深度的变化以灰度表示),及同一盘基某半径方向上深度变化曲线(横坐标为距盘基中心距离,纵坐标为深度值)。宽度变化俯视图和曲线形式类似。纵坐标采用国外原子力显微镜(AFM,型号:DimensionTM 3100,美国 DI 公司生产)标定,图 5 为同一盘基某点处的 AFM 图像及截面曲线。

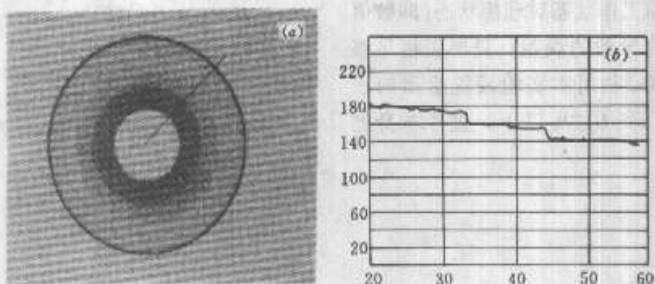


图4 本装置测试的 CD-R 盘基槽深图:(a)灰度图;(b)曲线

Fig.4 Testing results of groove depth for a CD-R substrate by our system

(a) top view image; (b) cross-section profile

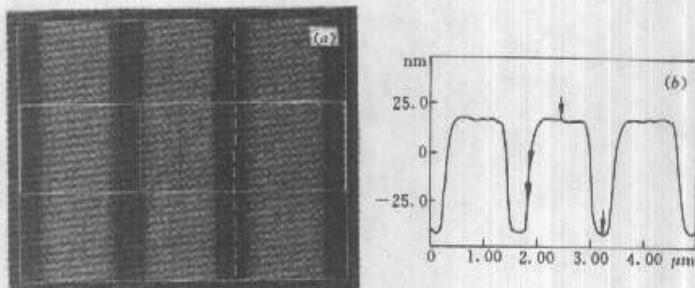


图5 同一 CD-R 盘基的 AFM 测试图:(a)灰度图;(b)曲线

Fig.5 Testing results of the same CD-R substrate by an AFM

(a) top view image; (b) cross-section profile

第2节中推导的公式对于说明仪器的原理及其相关的性质是正确的。但是,如上所述,由于槽形通常不是矩形以及标量衍射理论不能完全描述上述偏振光衍射行为,公式在具体测量中给出的结果势必为近似的结果,甚至与实际值相差很远。因此该公式在具体数值处理以及误差分析中并不使用。通常的做法是:对于某个槽倾角,按梯形槽形和矢量衍射理论<sup>[3]</sup>,对于一定范围的槽深和槽宽的每一个值计算出相应  $I_2/I_1$  和  $I_1/I_0$ , 给出一个计算机内部表格(对于仪器来说,  $\lambda$  是固定的,对于 CD-R 来说,  $n$  是固定的)。测量之前,选择槽倾角(某一工艺刻出的压模具有相同的槽倾角),因此选择了与该倾角对应的表格,测量过程中,仪器给出每一测量区域(光斑照射区域)  $I_2/I_1$  和  $I_1/I_0$ , 通过  $I_2/I_1$  和  $I_1/I_0$  的索引查表,可得到槽深和槽宽的测量值。另外,对于 CD-R 盘片生产厂家(而非母盘生产厂家)来说,基本上面对的是单一的槽深和槽宽,均匀性只是对这一槽形的微小的偏离,采用 AFM 对仪器进行标定的方法,基本上可满足使用要求(上面的实验数据就是采用该方法的结果)。测量误差因此包括两类:查表导致的插值误差;仪器实际工作状态对理想状态(即数值计算时的条件)的偏离导致的误差。只要表格足够密,插值误差就可忽略,利用本实验装置给出的表格,可将插值误差降低到 0.2% 以下。盘片本身的

翘曲、旋转电机轴的窜动和摆动以及径向移动导轨的非线性,在仪器工作时都会导致入射角的变化、衍射面在光斑焦深内的移动,从而导致对理想状态的偏离。我们严格控制旋转电机的误差以及导轨的误差,使其影响降低到盘片本身误差产生的影响之下。所幸这方面的原因导致的相对误差还在 1% 以下。 $I_2/I_1$  和  $I_1/I_0$  的测量对于该装置至关重要。三个光电探测和放大电路不仅要噪声低,还要求线性好、放大倍率稳定(由于  $I_2$ ,  $I_1$  与  $I_0$  相差较大,三个放大器的倍率是不同的)。由于采用了光调制技术,本装置  $I_2$ ,  $I_1$  与  $I_0$  的测量精度在 2% 左右,对于不同类型的盘基换算成槽深与槽宽的相对误差是有所不同的,对于 220 nm 深 690 nm 宽倾角 56° 的 CD-R 盘基来说,误差在 3.5% 左右。实验证明,该装置的测量灵敏度为 ~1%, 重复精度 < 5%。

#### 参 考 文 献

- 1 Manabu Yamamoto, Akinori Watabe, Hiroo Ukita. Optical pregroove dimensions: design considerations. *Appl. Opt.*, 1986, 25(22):4031~4034
- 2 Hidekazu Sekizawa, Kiyoshi Yamada, Akito Iwamoto. Disk-memory pregroove inspection. *Appl. Opt.*, 1984, 23(16):2830~2834
- 3 D. W. Prather, M. S. Mirotznik, J. N. Mait. Boundary integral methods applied to the analysis of diffractive optical elements. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, 14(1):34~43