

文章编号 10042924X(2003)0420368206

# 原子力显微镜(AFM)在光盘检测 及其质量控制中的应用

景蔚萱, 蒋庄德

(西安交通大学 精密工程研究所, 陕西 西安 710049)

**摘要:**综述了原子力显微镜(AFM)在光盘质量检测中的应用。AFM能够在 nm 尺度上直接对光盘及其模板上的信息位几何结构的特征尺寸及其误差进行三维测量,从而可以建立生产工艺参数和信息位几何结构之间、信息位几何结构和盘片电气性能之间的关系,进而找出影响光盘质量的直接原因。用 AFM 进行光盘质量检测主要有三方面:盘片和模板表面的定性观测;信息位几何结构的半定量分析;信息位特征尺寸的统计分析。定性观测和半定量分析可以对盘片播放的高误差率、凹坑形态和块出错率、凸台形态及其表面粗糙度等参数进行有针对性的检测;而信息位特征尺寸的统计分析则可以对信息位几何结构的关键参数进行面向生产过程的统计分析。所得结论表明 AFM 在光盘质量检测过程中具有独特的优势。

**关键词:**原子力显微镜(AFM);光盘;模板;凹坑;凸台;抖动

**中图分类号:**TP212 **文献标识码:**A

## Measurement and quality control of optical discs with atomic force microscope (AFM)

JING Wei2xuan, JIANG Zhuang2de

(Institute of Precision Engineering, Xi. an Jiaotong University, Xi. an 710049, China)

**Abstract:** Applications of Atomic Force Microscopy (AFM) in optical disc technology are summarized. AFM is ideally suited to the characterization of nanometer2scale pit and bump structures in CD/ DVD manu2facturing, so the relationship between production variables and pits/ bumps geometry as well as relations be2tween pits/ bumps geometry and electrical performance of discs can be established to perform direct quality control of CD/ DVD manufacturing. Applications of AFM in optical disc technology mainly fall into three parts: qualitative analysis of topography of discs/ stampers, sem2quantitative analysis of pits/ bumps geome2try of discs/ stampers and length analysis of data marks on bump with statistics technology. Qualitative analysis of topography of discs/ stampers and sem2quantitative analysis of pits/ bumps geometry of discs/ stampers are chiefly oriented to the measurements of high error rate at beginning of play, pit morphology and block error rate, track pitch variations, pit depth monitoring as well as bump morphology and its sur2face roughness. It is discovered that the efficiency of the cooling channels of the mold has deteriorated, re2sulting in the discs being separated from the stamper while they are too soft due to inadequate cooling in the

收稿日期: 2003201216; 修订日期: 2003202219.

基金项目: 国家教育部博士点基金项目(No. 1999069821); 高等学校骨干教师资助计划项目

area where high error rate and block error rate are frequently produced. Length analysis of data marks with statistics technology is aimed at the analysis of track pitch and pitch variation, bump length (offset, deviation, asymmetry) and AFM jitter, bump width and width variation, bump height and height variation as well as side wall angle (slope) and slope variation. Statistical analysis of AFM images yields important information about optical disc microstructure and in turn provides information about the performance of the manufacturing process. It is very useful to analyze geometric parameters by considering the fundamental length groups of the data marks. The obtained results demonstrate that AFM have particular advantages in the quality control of discs/ stampers manufacturing.

Key words: atomic force microscope (AFM); optical disc; stamper; pit; bump; jitter

## 1 引言

CD/DVD 光盘具有存储量大、成本低、精度高和信息保存寿命长等特点, 现已成为主要的数据储存介质。为了继续提高光盘容量及其质量, 需要改善盘片和模板表面质量的分析方法。原子力显微镜(AFM)可直接进行三维测量<sup>[122]</sup>, 能够在 nm 尺度上对 CD/DVD 及其模板上的信息位凹坑和凸台结构进行直接观测和统计分析, 进而找出影响光盘质量的直接原因。它具有效率高、能提供量化的三维信息和对样品无破坏的特点, 是分析 CD/DVD 盘片及其模板质量的重要工具。

## 2 原子力显微镜(AFM)和 CD/DVD 光盘

### 2.1 原子力显微镜(AFM)

1981 年, G. Binnig 和 H. Rohrer 等人发明了扫描隧道显微镜(STM), STM 采用电场电子隧道效应, 因而具有极高的测量分辨率。其测量机理是探针针尖与被测表面在近场范围内发生作用, 通过检测这种近场作用, 就可获得被测样品的表面形貌。近场作用是多种多样的, 利用不同的近场作用就可构成不同的测量仪器, 从而形成了扫描探针显微镜(SPM)族, 原子力显微镜(AFM)就是其中之一。

### 2.2 CD/DVD 光盘的生产过程及其技术要求

光盘按记录格式可分为 CD 和 DVD 两种; 按记录材料的性质可分为只读(CD/DVD-ROM)、一次写(CD/DVD-R)和可擦写(CD/DVD-RW)等形式。以 DVD/CD-R 为例, 光盘的生产过程: 预格式模板) 精密注塑) 盘基冷却) 溅射) 甩胶固化) 质量控制) 封装打边) 印刷商标等。

DVD 的信息位凹坑(或凸台)的最小特征尺寸长 400 nm、宽 320 nm、深 120 nm, 道间距为 740 nm。有两个重要的技术指标: 道间距和抖晃值。道间距的平均值必须为  $740 \pm 10$  nm, 每一个测量值必须在 710~770 nm 的范围内, 如果一张盘有 4 万圈数据, 则道间距的标准差必须在 7 nm 范围内; 盘片播放时的电气抖晃值的标准差必须小于通道位时间的 8%, 把时间转换为长度, 则通道位长度为 133 nm, 抖晃值要求凹坑的导入和导出边的标准偏差小于 11 nm。

根据检测仪器的精度至少要高于待检测产品的 4 倍的约定, 则道间距的检测工具的标准偏差应小于 2 nm, AFM 能有效地满足这样的检测要求。

## 3 CD/DVD 光盘的检测方法

### 3.1 CD/DVD 光盘测试参数

CD/DVD 光盘参数主要分为机械参数、光学参数和记录参数<sup>[324]</sup>。盘片播放时, 记录参数真正反映了盘片的播放性和兼容性, 因此记录参数是盘片测试的重点。

### 3.2 CD/DVD 光盘的检测方法

光盘的生产工艺参数决定了光盘上信息凹坑的几何形状, 而这些凹坑的几何形状则影响着光盘的播放质量和兼容性。有三种光盘质量检测方法:

#### (1) 间接检测

目的是分析光盘的播放性、兼容性与生产工艺参数之间的关系。间接检测的重要特征是, 测量结果表现为生产工艺参数与盘片的播放性及兼容性之间的关系, 而信息凹坑的几何形状参数是隐藏的变量。用光盘分析仪进行的间接质量控制

示意图如图 1 所示。

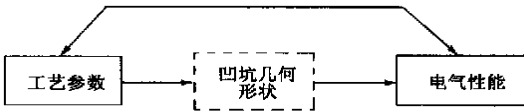


图 1 间接质量控制  
Fig. 1 Indirect quality control

### (2) AFM 直接检测

AFM 可以测量光盘(模板)上信息凹坑(凸台)的几何形状及其误差,从而可以建立生产工艺参数和信息凹坑(凸台)几何形状之间、信息凹坑(凸台)几何形状和盘片电气性能之间的关系,进而找出影响盘片播放性能和兼容性能的直接原因。用 AFM 进行的直接质量控制示意图如图 2 所示。



图 2 直接质量控制  
Fig. 2 Direct quality control

### (3) 光盘质量的统计分析

AFM 能测量数百个数据位的大小、形状和位置,所以对测量结果做进一步的统计分析。AFM 图像的长度分析法就是用统计分析的工具来进行光盘制造过程中的质量控制。比较信息凹坑的微结构和光盘的电气性能,就可以找出数据位微结构对盘片的播放性及兼容性的影响规律。

## 4 CD/DVD 光盘的 AFM 直接质量控制

### 4.1 起始播放时的高误差率

在不同的注塑机上所压制的光盘中观察到输出的数字信号出现高误差率,且随着光盘播放朝外圈推移,误差率逐渐减小。William G. Lutz, Gregory F. Meyers<sup>[5]</sup>和 Franky K. L. Fan 等人<sup>[627]</sup>用 AFM 分析注塑成型的盘片,发现盘基被严重地拉伤,从而使光盘部分或全部不能读出。

用 AFM 检查压制这些盘片用的模板表面,没有发现任何缺陷。对注塑成型的盘片在不同位置上做进一步的 AFM 分析,发现拉伤是由于模具冷却效果降低,在盘片局部区域还没有充分冷却时就进行脱模而造成的。

### 4.2 凹坑形态和块出错率(BLER)

图 3 显示了 William G. Lutz, Gregory F. Meyers 等人<sup>[5]</sup>所检测的 CD 光盘中凹坑结构的变化情况。图 3(a)中,凹坑结构很一致,并且精确地复制了模板;图 3(b)中,随着聚碳酸酯的堆积或向盘片周边方向推挤,凹坑发生了局域的变形,这种变形表现为可见的瑕疵,且该变形可能产生高的块出错率;图 3(c)中,聚碳酸酯表面发生了扭曲,一些凹坑几乎不能被识别,这是由于在脱模时凹坑周围的聚碳酸酯还粘在模板上而造成了严重的变形。



图 3 光盘的 AFM 敲击模式图像

Fig. 3 Tapping mode AFM images of disk surface

### 4.3 模板质量的 AFM 分析

模板的质量对一批光盘的品质有决定性的影响,所以必须对模板的生产进行预控制。NT2 MDT 的研究人员<sup>[8]</sup>用 AFM 检测模板的信息凸台上是否有平坦的区域(图 4(a)),他们发现如果观察不到这种平坦的区域(图 4(b)),那么在读盘时就会发生错误。AFM 还可以检测模板的信息位凸台的表面粗糙度,它影响激光束的反射,进而影响盘片的播放性。

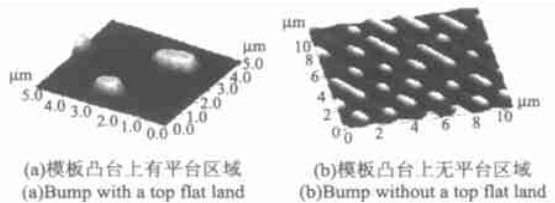


图 4 Ni 模板的 AFM 敲击模式图像

Fig. 4 Tapping mode AFM images of Ni stamper

### 5 CD/DVD 模板上数据位的 AFM 长度分析

AFM 能测量 CD/DVD 模板上数百个数据位的大小、形状和位置, 所以可以对测量结果做进一步的统计分析。通过比较微结构的几何参数和电气测量值, 就可以确认微结构几何参数与盘片播放性能之间的关系。Donald A. Chernoff, David L. Burkhead 等人<sup>[921]</sup>对此进行了深入的研究。

#### 5.1 特征尺寸的统计分析

在光盘质量的分析过程中, 首先对信息位凹坑(或凸台)几何形状的不同参数(如凸台高度)建立目标值, 然后与相应的实际值进行比较, 如果二者不一致, 则盘片在播放时就会产生相应的噪声, 具体参数如表 1 所示。

表 1 目标参数和噪声类别

| Tab. 1 Process position and noise parameters |        |
|--|--------|
| 目标参数   | 噪声     |
| 道间距  | 间距变化量  |
| 凸台长度(失调、偏差、不对称度)                             | AFM 抖晃 |
| 凸台宽度   | 宽度变化量  |
| 凸台高度   | 高度变化量  |
| 侧壁角度(斜度)                                     | 斜度变化量  |

表 2 模板凸台长度部分测量数据

| Tab. 2 A portion of the worksheet bump length h (nm) |    |         |          |
|--|----|---------|----------|
| T#   | N  | 平均值(nm) | 标准偏差(nm) |
| 3  | 35 | 359.88  | 5.33     |
| 4  | 29 | 494.40  | 6.58     |
| 5  | 17 | 631.55  | 4.52     |
| 6  | 8  | 760.97  | 4.01     |
| 7  | 6  | 895.50  | 6.92     |
| 8  | 2  | 1031.34 | 7.91     |
| 9  | 3  | 1160.23 | 4.02     |
| 10   | 2  | 1291.13 | 14.86    |

以 DVD 模板上的凸台长度作为例子。在图 5 凸台宽度和长度关系的示意图中, 可以看到以 T 号进行分类的测量数据。对图 5 的测量结果进行统计分析, 可以得到凸台长度的部分统计数据, 如表 2 所示。

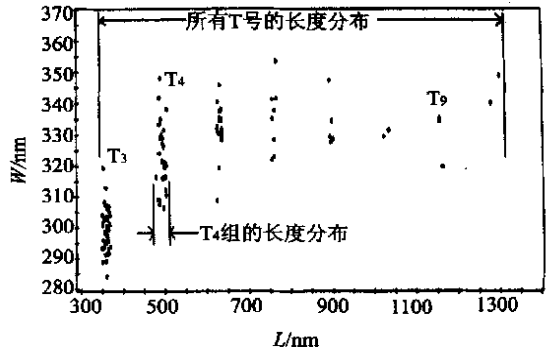


图 5 DVD 模板上凸台的宽度和长度之间的关系 Fig. 5 Width vs. length for bumps on a DVD stamper

因为组内的标准偏差为,

$$SD_w = \sqrt{CSS/DF}, \tag{1}$$

其中: CSS 为每一组的标准偏差的平方( $SD_i^2$ )乘以观测数( $n_i$ )(权重), DF 为所有组的观测次数, 即

$$CSS = \sum_{i=1}^g (SD_i^2 @ (n_i - 1)), \tag{2}$$

$$DF = \sum_{i=1}^g (n_i - 1), \tag{3}$$

由表 2 的数据得:  $CSS = 3\ 188.949\ 8\ \text{nm}$ ,  $DF = 94$ ,

所以  $SD_w = \sqrt{CSS/DF} = 5.82\ \text{nm}$ 。

#### 5.2 抖晃

母化光盘的目标是把凹坑特征边置于正确的位置上。为了研究特征边位置误差对电气抖晃值的影响, 需要计算特征边抖晃(AFM 抖晃)。虽然 AFM 不能扫描足够大的区域来计算平均时钟, 但是通过分析凸台长度和平台长度的变化量可以推断出边缘抖晃值,

$$AFMJitter = \left( \frac{SD_w}{\sqrt{2}} \right) @ \left( \frac{100}{CBL} \right), \tag{4}$$

其中: CBL - 通道位长度;  $\frac{100}{CBL}$  - 长度抖晃转变为通道位长度的百分比;  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  - 数据到数据0抖晃转化成数据到时钟0抖晃。

当相对于时钟进行测量时, 假设导入和导出边为正态分布, 互相独立, 且偏差相同。根据误差传播的正法规则, 可以得出,

$$SD_w = SD(\text{Length}) = SD(\text{Edge}_1 - \text{Edge}_2) = \sqrt{(SD_1^2 + SD_2^2)} = \sqrt{2} @SD_1, \quad (5)$$

其中:  $SD_1$  和  $SD_2$  分别为凸台导入和导出边的标准偏差。从而

$$SD_1 = \frac{SD_w}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

根据上述思路, 用表 3 中 T# 和平均值进行最小二乘拟合得,

$$y = -39.21 + 133.51x, \quad (7)$$

直线斜率为通道位长度 CBL (133.51 nm), 该直线与纵轴(长度平均值)的交点坐标为长度失调值 -39.21 nm。

表 3 T# 与平均值(nm)的关系  
Tab.3 T# and mean (nm)

|     |        |          |          |          |
|-----|--------|----------|----------|----------|
| T#  | 3      | 4        | 5        | 6        |
| 平均值 | 359.88 | 494.40   | 631.55   | 760.97   |
| T#  | 7      | 8        | 9        | 10       |
| 平均值 | 895.50 | 1 031.34 | 1 160.23 | 1 291.13 |

所以,  $AFM_{\text{jitter}} = \left(\frac{5.82}{\sqrt{2}}\right) @ \left(\frac{100}{133.51}\right) = 3.08\%$ 。

### 5.3 长度偏差与长度失调

模板的凸台长度对光盘电气性能的影响特别突出。利用 AFM 测量得到的实际长度(如表 2), 可以得出长度偏差值。

$$\text{Deviation} = \text{MeanLength} - (T\# @CBL), \quad (8)$$

例如对于某种能量系列制备的模板, 偏差值计算如表 4, 其中  $CBL = 133.51 \text{ nm}$ 。

长度失调是检测所有 T 号组的凸台或平台与它们名义长度的平均差别, 由长度与 T 号关系图中 T = 0 处的交点可以得出长度失调量。在计算通道位长度 CBL (133.51 nm) 时, 就同时得出长度失调值(-39.21 nm)。用同样方法可以得出其它能量水平的长度失调值。

继续作进一步的分析, 可以得出激光能量失调与长度失调之间以及长度失调与模板分析仪所测的不对称性之间的关系。

表 4 T# 和标准偏差(nm)的关系  
Tab.4 T# and SD (nm)

|      |        |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|--------|
| T#   | 3      | 4      | 5      | 6      |
| 标准偏差 | -40.65 | -39.64 | -36.0  | -40.09 |
| T#   | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 标准偏差 | -39.07 | -36.74 | -41.36 | -43.97 |

表 5 某种能量系列模板的微结构和电气测量值

Tab.5 Microstructure and electrical measurements for a power series stamper

|               | 凸台                    |        |        | 平台     |        |        |        |
|---------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               | 激光能量失调                | 12.5%  | 0.0%   | -10.0% | 12.5%  | 0.0%   | -10.0% |
| AFM 和数据位的长度分析 | AFM 抖晃                | 3.20%  | 3.29%  | 3.34%  | 3.00%  | 3.35%  | 3.54%  |
|               | 通道位长度(nm)             | 132.94 | 133.05 | 132.63 | 132.66 | 133.26 | 135.05 |
|               | 长度失调                  | -7.09  | -37.61 | -74.91 | 1.90   | 34.20  | 65.32  |
|               | T <sub>3</sub> 宽度(nm) | 322.27 | 299.13 | 259.80 |        |        |        |
| 模板播放器         | 抖晃                    | 10.10% | 7.10%  | 15.20% |        |        |        |
|               | 不对称度                  | 17.90% | 6.10%  | -5.90% |        |        |        |

### 5.4 AFM 长度分析和模板分析仪测量结果的比较及讨论

表 5 对 AFM 和模板分析仪所获得的部分测量值作了比较。在较大的激光能量范围内, AFM 抖晃和通道位长度没有明显变化; 相反, 凸台和平台的长度失调以及 T<sub>3</sub> 组的宽度有明显的变化。

对于模板分析仪的测量, 随着激光能量水平的降低, 不对称性单调减小, 而抖晃值先减小到最小, 然后再增加。

从表 5 可以看出, 由于 AFM 测量特征边的位置时不受光学效应的影响, 而模板分析仪对这些影响因素非常敏感, 所以 AFM 测量的抖晃值

与模板分析仪测量的抖晃值之间没有关联性,并且模板分析仪所测的抖晃值较高;另外,不对称性的变化范围有可能超出均衡器电路的补偿容量,其最高或最低值有可能使抖晃值升高;AFM测量的抖晃值还表明,在母盘化期间特征边位置的精度没有受到激光能量水平变化的影响。

适合于对 CD/ DVD 光盘及其模板上 nm 尺度的信息凹坑和凸台的结构进行定性和定量分析,进而找出影响光盘质量的直接原因。另外,AFM 还集加工与表征测量于一体,具有较好的实时监控和加工能力,这对于未来研制更密更快的光存储介质及海量存储系统等也有重要意义。

## 6 结 论

原子力显微镜(AFM)可直接进行三维测量,

### 参考文献:

- [1] 王富生,谭久彬.表面微轮廓的高分辨率光学测量方法[J].光学精密工程,2000,8(4):302315.  
WANG F S, TAN J B. Methods of high resolution optical measurement for surface profile[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(4): 302315. (in Chinese)
- [2] 周明宝,郭大键.微结构表面形貌的测量[J].光学精密工程,1999,7(3):713.  
ZHOU M B, GUO D J. Measurement of microstructure topography[J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(3): 713. (in Chinese)
- [3] 徐端颐.光盘存储系统设计原理[M].北京:国防工业出版社,2000.24236.  
XU D Y. Principle and design of optical storage system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 24236. (in Chinese)
- [4] 马立军,徐端颐.DVD盘片质量测试系统的研究与开发[J].激光与红外,2000,30(6):362366.  
MA L J, XU D Y. Study and development of DVD's testing system[J]. Laser & Infrared, 2000, 30(6): 362366. (in Chinese)
- [5] LUTZ W G, MEYERS G F. Applications of atomic force microscopy in optical disc technology[EB/OL]. [http://www.veeco.com/appnotes/AN18\\_CD\\_DVD.pdf](http://www.veeco.com/appnotes/AN18_CD_DVD.pdf).
- [6] FRANKY K L Fan, YEUNG Dr S M S, WILLIAM M C Ng. Cloud elimination in DVD production[J]. Tape Disc Business, 1998, 28(9): 2232.
- [7] FRANKY K L Fan. Towards shorter replication cycle time[J]. Tape Disc Business, 1997, 27(2): 2226.
- [8] Molecular device and tools for nanotechnology. SPM Analysis of the CD/DVD Discs[EB/OL]. [http://www.ntmdt.ru/Application2Notes/Science\\_Technology\\_Applications/Data\\_storage/SPM\\_analysis\\_of\\_the\\_CDDVD\\_discs/text24.html](http://www.ntmdt.ru/Application2Notes/Science_Technology_Applications/Data_storage/SPM_analysis_of_the_CDDVD_discs/text24.html)
- [9] CHERNOFF D A, BURKHEAD D L. Automated, high precision measurement of critical dimensions using the atomic force microscopy[J]. J Vac Sci Technol, 1999, A17: 145721462.
- [10] CHERNOFF D A, BURKHEAD D L. AFM length analysis of data marks: measuring jitter, asymmetry, process noise and process position[J]. SPIE, 2001, 4342: 1222.
- [11] COOK C S, CHERNOFF D A, BURKHEAD D L. Automated analysis of data mark microstructure of various media in the optical disc industry[J]. SPIE, 2000, 4090: 1225.

作者简介:景蔚萱(1966-),男,陕西乾县人,西安交通大学精密工程研究所在读博士研究生,主要从事基于SPM的纳米测量、纳米加工等微/纳米技术的研究。