

STM 研究光盘材料结构转变前后 表面形貌的分形维数

北京航空航天大学 袁凯华 戎霭伦

采用 STM 在纳米尺度上对光盘材料结构转变前后表面微观形貌进行了研究。STM 结合图象处理和傅利叶分析法可以较好地用于研究薄膜表面形貌的分形特征。用电子束蒸发制备的无定形态记录介质薄膜表面形貌在纳米尺度上呈现出分形特征,经加热晶化后介质薄膜发生结构转变,表面形貌的分形维数增加。

关键词: 光盘, STM, 表面形貌, 分形, 分形维数

Study on Fractal Dimension of Surface Morphology Before or After the Structure-change by STM

Yuan Kaihua Rong Ailun

(Beijing University of Aeronautics & Astronautics)

STM has been used to investigate the nanometer-scale morphology of the surface of recording media before or after the structure-change. Combining the image-processing software with Fourier analysis method, STM can be used properly to study the fractal property of the morphology of the films. The morphology of the amorphous film, which is prepared by electron beam evaporation method, displays fractal property in nanometer scale. After heating, the film transforms from non-crystalline state to crystalline state, and the fractal dimension of its surface morphology increases.

Keywords: Optical Disk, STM, morphology, fractal, fractal dimension

一、引言

随着人类社会进入信息时代,光盘技术以其高存储密度、长存储寿命、低信息位价格等引人注目的特点日益受到人们的重视。相变型光盘采用记录介质在晶态与非晶态之间的可逆相变完成信息的存储和擦除,是目前主要的研究方向之一。为了提高相变型光盘的擦写速度,对于记录介质相变过程的研究是十分重要的^[1]。Mandelbrot 提出的分形理论^[2]可用于材料显微结构的定量表征,分形维数是描述分形结构特征的重要的几何参量。近年来,人们利用光学显微镜和 SEM 等手段,对于薄膜材料和金属断口的表面形貌进行了很多研究^[3-5]。但是,由于实验手段的限制,通常只能获得材料在微米尺度上的分形特征,并具有实验过程和数据处理复杂繁琐等缺点。扫描隧道显微镜 (STM) 作为新一代的电子显微镜,具有纳米级乃至原子级的分辨率,可以在不破坏样品的情况下直接获得材料表面微观形貌的三维图

象,便于进行数据处理。利用 STM 这一有力工具研究薄膜材料表面形貌分形维数的工作,国外刚刚起步^[6-8],国内还未见报道。本文利用 STM 在纳米尺度上测得了光盘记录介质的表面形貌,进行了分形维数的计算,并比较了结构转变前后分形维数的变化。

二、实验过程

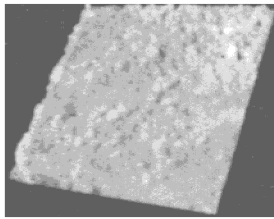
样品制备采用电子束蒸发,将光盘记录介质 12431 材料沉积在玻璃衬底上形成薄膜。蒸发前预真空抽至 5×10^{-4} Pa。刚制成的样品为无定形态薄膜,厚度约为 600 Å。将此薄膜在保护气体中加热至 200℃ 并保持 30min,则记录介质发生无定形态至晶态的结构转变,形成晶态薄膜样品。薄膜表面微观形貌的观测采用 CSTM-9000 型扫描隧道显微镜 在常温和大气中完成。针尖采用 Pt-Ir 合金丝,其直径约为 0.1mm,用机械加工方法制成针尖。STM 扫描模式为恒流模式。用图象软

件对获得的图象进行处理,可以获得样品表面形貌的轮廓线,由此轮廓线可以计算出表面形貌的分形维数。

分形维数的计算有很多方法^[4],其中最常见的是所谓 box-counting 法。这种方法用不同长度的码尺 η 测量该分形曲线,其测量长度 L 满足关系式^[4]

$$L = L_0 \eta^{-D} \quad (1)$$

其中 L_0 为常数, D 为该曲线的分形维数。因此,由 L 和 η 的双对数曲线的斜率 β 即可求出分形维数 $D = 1 - \beta$ 。另一种方法是傅利叶分析法^[10]。从数学极限上看,两种方法是一致的,但在实际计算中,轮廓线是由一系列离散的数据点所描述的, Dubuc 等人^[11]对人为构造的、已知分形维数的数学曲线用不同方法计算了分形维数,结果发现傅利叶分析法比 box-counting 法更准确。因此本文采用傅利叶分析法计算分形维数 D 。具体步骤:首先用图象软件获得样品表面形貌图象在不同位置上的轮廓线,然后将这些曲线进行傅利叶变换求出功率谱。为



(a)

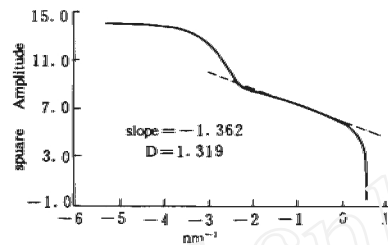
了减少误差,将这些功率谱曲线进行平均,并由频率高端向低端积分,在双对数坐标上作出积分后的功率谱曲线,用线性回归法求出其直线部分的斜率 m ,则分形维数 D 可以表述成

$$D = 2.0 + m/2$$

分形维数 D 可以定量地描述表面形貌轮廓线的分形特征,作为随机表面粗糙度的一种度量,以上工作在 AST-486 微机上完成。

三、结果及分析

图 1a 给出了无定形态样品表面微观形貌的图象,其尺度为 $400\text{nm} \times 400\text{nm}$ 。隧道电流为 0.7nA ,偏压为 2.0V 。图 1b 是 a 图中 10 个不同位置上的轮廓线经傅利叶分析法所得的积分功率谱曲线,坐标轴为双对数坐标。



(b)

图 1 无定形态样品表面微观形貌及相互均分功率谱曲线

由图 1b 可见,该曲线中间部分具有很好的线性,直线拟合结果斜率为 $m = -1.362$,相关系数为 0.993 ,这说明该样品的表面微观形貌确实呈现出分形特征,其分形维数 $D = 1.319$ 。在分形数学理论中,自相似具有无穷嵌套结构;但在物理实体和过程中,无穷嵌套一般是不存在的,也就是说,物理实体仅在一定尺度上呈现出分形特征。图 1b 中的曲线仅在中间部分呈现出很好的线性,其对应尺度范围约 $10 \sim 1\text{nm}$ 正说明了这一点。

图 2a 是晶化后的样品表面微观形貌的图象,其尺度为 $400\text{nm} \times 400\text{nm}$ 。隧道电流为 1.0nA ,偏压为 0.1V 。图 2b 是相应的积分后功率谱曲线,其中间部分仍呈很好的线性,可求出斜率 $m = -1.172$,相关系数 0.998 ,分形维数 $D = 1.414$ 。比较图 1 和图 2 可以发现,无定形态样品表面比较平整,而晶化后的样品表面出现了一些“山谷”,其分形维数也比结构转变前要高。

材料工程

为了更好地比较样品结构转变前后表面形貌分形维数的变化,用 STM 在样品的不同位置进行测量,表 1 给出了实验数据和分形维数的平均值,结构转变后分形维数由 1.343 增加到 1.404 。

表 1 实验数据及分形维数平均值

位置	1	2	3	4	5	平均值
无定形态	1.319	1.382	1.307	1.365	1.343	1.343
晶态	1.414	1.403	1.395	1.370	1.437	1.404

Mitchell 等人曾经指出^[9],在傅利叶变换计算分形维数的过程中,决定误差的主要因素是傅利叶变换的精度。由于傅利叶变换的精度和数据点的数目密切相关,因此如果描述轮廓线的数据点过少,计算得的分形维数 D 误差也就越大。Mitchell 指出,当采用 $100 \sim 200$ 个数

据点时,误差可高达0.35,以上的实验和计算中的轮廓线数据点为1400个,根据 Mitchell 的计算,其误差应小于0.03。故表1中的数据说明无定形态记录介质结构转变后表面形貌的分形维数确实增加,从无定形态转变为晶态,对应着材料的结构从无序向有序的转变。在此

过程中,表面形貌的分形维数 D 由 1.343 增加到 1.404。因此, D 与薄膜结构的有序程度密切相关,有可能构造有序度 $\xi = f(D)$, 作为定量描述和研究结构转变过程的序参量。

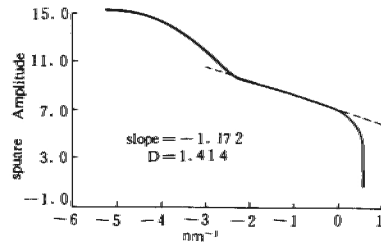
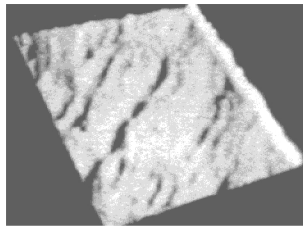


图2 晶化后样品表面微观形貌及相应的积分后功率谱曲线

四、结论

STM 可用于研究材料表面微观形貌的分形特征,结合图像处理 and 傅利叶分析方法,可以很好地求出表面形貌的分形维数。光盘记录介质无定形态薄膜表面在纳米尺度上的微观形貌呈现出分形特征,其分形维数为 1.343。结构转变后表面形貌的分形维数增加,由 1.343 增加到 1.404。将 STM 用于研究光盘记录介质结构转变前后表面微观形貌分形维数的工作,将为光盘材料转变机制的研究开辟一个新的途径。

参考文献

1. 戎佩伦、司徒活、张忠麟,光信息存储的原理、工艺及系统设计,国防工业出版社,1993
2. B. Mandelbrot, Fractal Geometry of Nature (W. H. Freeman & Co., San Francisco, CA, 1982)
3. B. Mandelbrot et al., Nature, 308 (1984), 721
4. 黄荣芳等,薄膜科学与技术,5 (1992), 36
5. C. W. Lung and Z. Q. Mu, Phys. Rev., B38 (1988), 16, 11781
6. Morgan W. Mitchell and Dawn A. Bonnell, J. Mater. Res., Vol 5, No10, Oct 1990, P2344
7. J. M. Gomez-Rodriguez et al., Ultramicroscopy 42-44 (1992), 1321
8. M. Aguilar et al., Ultramicroscopy 42-44 (1992), 1329
9. 林鸿强、李映雪,分形论—奇异性探索,北京理工大学出版社,1992
10. J. Feder, Fractals (Plenum Press, New York, 1988)

11. B. Dubac et al., Phys. Rev., A39, 1500-1552 (1989)

橡胶配方设计的得力助手

—EDAS 配方设计分析系统

随着市场经济不断深入,电脑软件在科研生产中的应用日益受到重视。上海橡胶制品研究所研制的试验设计分析系统—EDAS 软件系统为配方人员提供了这种需要,该软件系统集橡胶配方设计要求、数理统计知识和计算机技术于一体,既能用于新配方体系的探索和建立,又可通过因素的改变来预测未实验的配方。EDAS 软件的应用对配方人员的计算机知识不作任何要求,仅需稍加指点即可操作。

EDAS 软件系统具有配方试验设计、试验数据的回归分析、配方试验数据库、绘图分析(二、三维)、多维变量配方性能分析、配方优选分析、线性回归分析等11类功能。该软件系统不仅适用橡胶行为,还适用塑料、粘接材料、化工、医药、冶金和建材等行业。

EDAS 软件系统开发至今,经一些单位使用,在科研、行产中具有较大效益,普遍认为用 EDAS 系统能够快速分析实验结果,较全面了解研究性能的变化规律,便于电脑预测配方,较明显地加速了新产品的开发过程。此外,研究人员可把电脑分析出的结果编制成实验配方手册,便于经验积累和查询。

(赵正平)

1994年10期