

ZnO/TiO₂ 复合薄膜的表面形貌分析及光散射特性研究

崔 骥 刘 晔 李永强 蒋立勇 王清华 李相银 贺安之
(南京理工大学理学院信息物理与工程系, 江苏 南京 210094)

摘要 采用离子源辅助电子束蒸发的方法, 制备了以 Si 为基底, 以 TiO₂ 为缓冲层的 ZnO 薄膜。通过进一步保温处理, 在不同温度条件下进行退火处理得到了不同的样品薄膜, 用于表面形貌分析和光散射特性实验研究。结果表明, 退火温度对样品表面粗糙度、晶粒大小、分形维数等参数具有显著的影响, 通过表面形貌分析有助于更好地理解薄膜晶粒生长机制和改进薄膜制备工艺; 不同薄膜样品的反射光强度和偏振度对不同偏振光具有不同的角度响应特征, 且与薄膜表面统计特性具有一定的关联性, 薄膜的光散射特性研究对研究弱散射随机粗糙表面的退偏作用具有一定的参考价值。

关键词 薄膜; 表面形貌; 分形理论; 光散射特性

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0207002

Morphology Analysis and Light Scattering Properties Study on ZnO/TiO₂ Composite Thin Films

Cui Ji Liu Ye Li Yongqiang Jiang Liyong Wang Qinghua Li Xiangyin He Anzhi

(Department of Information Physics and Engineering, College of Science,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The ion source electron beam evaporation method was used to fabricate ZnO films with Si as the base and TiO₂ as the buffer layer. By further thermal insulation, and annealing treatment at different temperature conditions, different film samples were prepared for the surface morphology analysis and light scattering properties study. The experimental results show that annealing temperature has significant influence on the sample surface roughness, grain size, fractal dimension and other parameters, and the surface morphology analysis is helpful to understand the grain growth mechanisms of film and improve the film preparation process. The intensity and polarization degree of reflected light for different film samples have different response to different polarized lights, which has some relevance to the surface statistical properties of film samples. The light scattering properties study of thin films has some reference value for the study of depolarization effect for weak scattering random rough surface.

Key words thin films; surface morphology; fractal theory; light scattering properties

OCIS codes 290.1350; 290.5880; 010.6860

1 引言

薄膜表面的形貌结构与薄膜的生长机理以及吸附、反射等很多表面现象密切相关^[1,2], 同时表面的随机粗糙程度还直接关系到薄膜的机械、电学和光学等方面的性质和功能^[3]。因此, 对薄膜表面形貌测量及统计参数分析的研究具有理论和应用上的重

要意义, 是薄膜研究领域的重要课题。

通常采用表面粗糙度体系来描述薄膜随机表面统计性质, 但表面粗糙度体系仅能反映薄膜表面的粗糙度和颗粒尺度信息, 并不能全面呈现出薄膜表面的统计规律。因此, 近年来对薄膜表面的自仿射分形理论^[4]研究成为了薄膜表面统计特性分析的另

收稿日期: 2010-08-15; 收到修改稿日期: 2010-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(10904072)、江苏省自然科学基金(BK2010483)和南京理工大学基金(2010ZYTS059, AE88030)资助课题。

作者简介: 崔 骥(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光技术及光电测试等方面的研究。

E-mail: cuiyangji2001@yahoo.com.cn

一个研究热点。该理论提出用分形维数 D 和特征长度 A 两个主要参数来反映表面形貌特征,能够提供传统的表面粗糙度评定参数所不能提供的信息,其参数值不随取样长度和仪器分辨率变化。分形几何的描述对象是在统计意义上局部与整体之间存在自相似性的集合,这类集合具有不规则、不光滑、不可微的特征。

随着表面测量仪器精确度的大幅提高,尤其是扫描探针显微镜等纳米原子级别显微仪器的使用,使得薄膜表面精细分形理论的研究更加方便,国外众多科研院校和机构在该领域纷纷开展了富有成效的研究。例如,西班牙 Ciudad 大学 A. Sanchez 等^[5]利用卢瑟福背散射光谱术和透射电镜(TEM)测定激光辐射前后 GeAl 多层薄膜的微结构,得到激光辐射导致在多层膜中形成多重分形花样的结论。韩国 Pohang 科技大学 Y. B. Park 等^[6]研究了金属有机化学气相沉积(MOCVD)法在 TiN 衬底上生长的金属铜(Cu)薄膜的结构和分形标度行为,发现 Cu 膜当温度低于 200 °C 时属于表面反应控制生长机制,其晶粒的择优取向随沉积时间和薄膜的覆盖度而不断变化。荷兰 Groningen 大学 G. Palasantzasa 等^[7]利用扫描隧道显微镜(STM)和扫描电子显微镜(SEM)研究了采用固相外延沉积法制备的凝聚阈值(600 °C)附近的超薄 CoSi₂ 膜的表面形貌,并采用高度-高度相关函数法量化薄膜的表面形貌,发现其表面形貌表现出强烈的各向异性,CoSi₂ 薄膜网状针孔在退火温度超过 600 °C 时凝聚成二维分形花样。国内的各个高校、研究所也都积极开展了对薄膜表面形貌分形特征的理论 and 实验研究,其中中国科技大学的孙霞等^[8,9]从事分形在薄膜生长中的应用方面的研究,从 20 世纪 90 年代开始,他们在前期做了很多基础性的研究工作。

本文利用表面粗糙度体系和自仿射分形理论对薄膜进行表面形貌测量和统计规律分析,并结合光散射实验分析薄膜表面统计特性与光散射特性之间的关系,为研究薄膜的生长机制和应用提供一定的参考。

2 ZnO/TiO₂ 复合薄膜表面形貌分析实验

2.1 薄膜样品制备

采用在 Si 基底上,以 TiO₂ 作为缓冲层,利用离子源辅助电子束蒸发的方法,并采用保温处理的手段,制备在不同退火温度条件下的 ZnO/TiO₂ 复合

薄膜。镀膜设备采用韩国普卢泰公司生产的 PMC-90S 高真空蒸发式光学镀膜机。

实验的制备过程为: 1) 300 °C 下,在 Si 片上沉积 TiO₂ 缓冲层; 2) 300 °C 下,在 TiO₂ 缓冲层上沉积 ZnO; 3) 保温处理: 将沉积室内温度从 300 °C 升至 400 °C, 然后进行 30 min 的保温处理。这种保温处理相当于对制备好的复合薄膜进行了一次预退火,避免样品在退火前与空气发生接触产生反应而影响薄膜的结晶特性; 4) 退火处理: 找出 3 块经过上述保温处理的薄膜,在空气中用管式炉进行退火处理 2 h,退火温度分别为 500 °C, 600 °C, 700 °C, 用于比较不同退火温度对 ZnO 薄膜表面的结构特性的影响。

经过上述步骤,得到了所需的实验薄膜样品。将未经退火的 ZnO/TiO₂ 复合薄膜标记为样品 A1; 在温度 500 °C, 600 °C, 700 °C 退火的 ZnO/TiO₂ 复合薄膜,分别标记为样品 A2, 样品 A3 和样品 A4。

2.2 薄膜表面的形貌测量与分析

2.2.1 薄膜样品表面的原子力显微镜图像

采用本原 CSPM4000 型扫描探针显微镜来测量不同样品的表面形貌。设定原子力显微镜(AFM)扫描器的扫描范围为 4.0 μm × 4.0 μm, 扫描频率为 1 Hz, 扫描分辨率为 1024 pixel × 1024 pixel, 扫描方式为接触模式。

如图 1(a) 所示,对于仅经过保温处理的样品 A1,从图中可以发现其晶粒较为清晰,晶粒排列呈“丘陵状”,与此同时不同的局部区域均匀性不是很好,局部有轻微的团簇现象,表面高低起伏比较剧烈,最大起伏高度达到 109.29 nm,由此可见经过保温处理的 ZnO/TiO₂ 复合薄膜已出现结晶现象,但结晶均匀性有待提高; 当在 500 °C 温度时对复合薄膜进行退火后,从图 1(b) 中可以明显发现样品 A2 表面结晶不均匀现象消失,并且晶粒排布趋于密集,晶粒比较圆润,呈“半球状”,薄膜表面的均匀性得到大幅提高,表面高低起伏比较平缓,最大起伏高度下降到 43.26 nm; 随着退火温度增加到 600 °C,从图 1(c) 中可以看出样品 A3 表面出现明显的晶粒增长迹象,且表现出“双峰分布模式”,此时薄膜表面的均匀性依然较好,表面高低起伏比较平缓,最大起伏高度进一步下降到 34.04 nm; 当退火温度进一步增加到 700 °C 时,从图 1(d) 中可以明显看出样品 A4 表面的晶粒排布较为疏松,不同的局部区域均匀性不好,局部出现团簇和烧孔现象,并且表面存在明显孔隙,结晶效果明显下降。

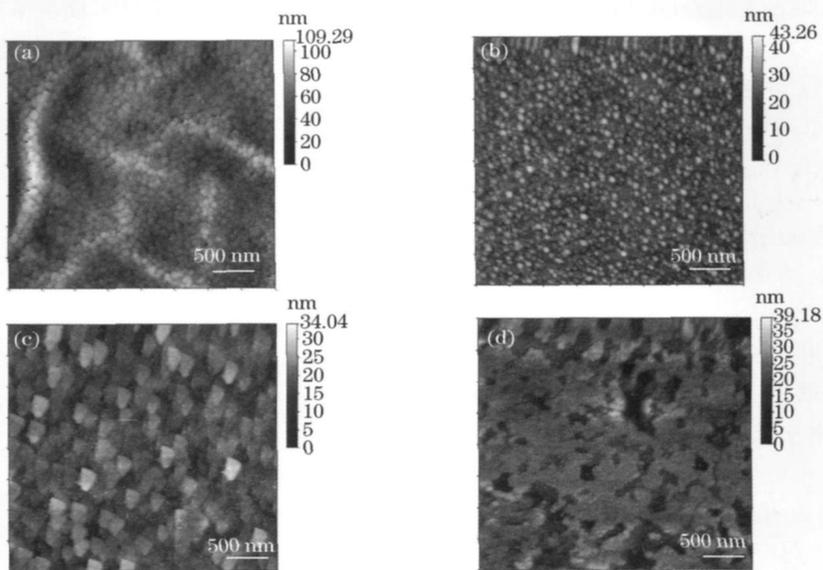


图 1 (a)~(d) 分别表示样品 A1~A4 的表面形貌二维图

Fig. 1 (a)~(d) Two dimensional map surface topography of samples A1~A4

通过对比, 可以看到, 经过保温处理的 ZnO/TiO₂ 复合薄膜已出现结晶现象, 随着退火温度从 400 °C 增加到 600 °C, 薄膜的结晶效果越来越好, 晶粒的大小和形状也开始变化, 而当退火温度到 700 °C 时, 薄膜表面开始出现明显的团簇和烧孔现象, 结晶效果下降。可见, 对薄膜的退火处理在一定程度上能够改善表面的结晶状况, 能够促进薄膜晶粒的增长, 导致晶粒之间的空隙逐渐减少, 晶粒排列愈加紧密, 但到达一定的极限温度时, 则会使得表面状况变差, 出现一些明显的凹凸缺陷特征。

2.2.2 薄膜样品表面的粗糙度和粒径大小

表 1 给出了通过后期分析软件计算得到的不同样品的 S_a (平均粗糙度), S_q (均方根粗糙度), S_{sk} (表面偏斜度) 和 R_a (平均粒径大小) 4 个参数值。从表中可以看出: 1) 样品 A1 的表面平均粗糙度和均方根粗糙度都明显大于其他几个样品, 这说明薄膜未经退火处理时的粗糙度明显偏大, 即用管式炉对薄膜进行退火处理可以明显降低复合薄膜的表面粗糙度; 2) 样品 A3 的表面偏斜度 S_{sk} 值为正值且比较小, 表明该样品薄膜的表面在基准面之下基本上没有明显的“坑”存在, 而样品 A4 的表面偏斜度 S_{sk} 值为负值且比较大, 表明该样品薄膜的表面在基准面之下具有很大的“坑”存在, 这是因为此时薄膜表面出现了严重的烧孔现象; 3) 不同样品表面颗粒平均粒径随着温度的增加呈现出先减小后增大的趋势。分析其原因主要如下: 未退火时薄膜表面的结晶性能不是太好, 导致颗粒之间的团聚现象明显, 因而颗

粒平均粒径比较大; 退火温度达到 500 °C 后, 薄膜表面的结晶性能提高, 颗粒粒径变小; 退火温度达到 600 °C 时, 颗粒粒径明显增大, 这是因为这时薄膜晶粒的生长逐渐转变为横向生长和纵向生长; 当退火温度达到 700 °C 时, 由于出现烧孔和团聚现象, 颗粒的平均粒径出现破坏性增大。

表 1 不同样品薄膜的表面参数统计表

Table 1 Statistics tables of surface parameter for different film samples

Surface parameters	Samples			
	A1	A2	A3	A4
S_a /nm	9.56	3.52	3.56	4.59
S_q /nm	12.4	2.98	3.06	3.52
S_{sk}	0.239	0.176	0.358	-0.905
R_a /nm	96	62.7	72.7	78.6

2.2.3 薄膜样品表面的分形特征

分形维数的计算方法有很多种, 通常用到的是盒计数法、面积周长法、高度自关联函数法等。其中高度自关联函数法^[10] 物理意义明确, 计算方法简单有效, 精度比较高, 因此应用越来越广泛, 也非常适合于对薄膜与金属表面自仿射分形特征的特征。这里采用该方法计算不同薄膜样品表面的分形维数。

根据随机表面的高度信息三维图像, 定义关联函数 $G(r)$, 其物理意义是指表面上相距 $r = |r|$ 的两个位置之间的相互关系, 表示为

$$G(r) = \frac{1}{L^2} \int [h(r' + r) - h(r')]^2 d^2 r', \quad (1)$$

式中 L 为扫描距离 ($r \ll L$)。对于具有自仿射分形结构的表面, $G(r)$ 是 r 的函数, 其关系式表示为

$$G(r) \propto \begin{cases} r^{2\alpha} & (r < \xi) \\ 2\omega^2(r) & (r > \xi) \end{cases}, \quad (2)$$

$$\omega(r) = \frac{1}{L} \left\{ \int [h(r) - \langle h(r) \rangle]^2 d^2r \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

式中 $\omega(r)$ 描述了表面沿其垂直方向的随机波动程度, α 为粗糙度指数, ξ 为与表面平行的相关长度, $h(r)$ 为三维图像中 $r = (x, y)$ 坐标位置处的表面高度。(2) 式表明, 在相关长度范围内 ($r < \xi$), 表面高度的波动是相互关联的, 且 $G(r)$ 是 r 的函数, 两者成幂指数关系; 在相关长度范围外 ($r > \xi$), 表面高度是相互独立的。

分形维数 D 的值可以通过

$$D = d - \alpha \quad (4)$$

求得, 式中 d 为欧氏空间维数, 薄膜表面处于三维空

间, $d = 3$ 。因此, 求得不同 r 下的关联函数 $G(r)$, 即可通过 $\lg G(r) - \lg r$ 的直线斜率 2α , 然后求出分形维数 D 。

为了评价不同薄膜样品表面的分形特征, 根据 2.2.1 节得到的不同薄膜样品的 AFM 图像, 采用 (2) 式, 计算得到如图 2 所示的不同薄膜样品表面的 $\lg G(r) - \lg r$ 曲线。由图可见, 薄膜表面形貌具有典型的分形特征, 表现为在一定范围内 ($r < \xi$), $\lg G(r)$ 与 $\lg r$ 形成良好的线性关系; 当超过这个范围时 ($r > \xi$), $\lg G(r)$ 的变化出现指数上升特征。通过对高度相关函数曲线的线性拟合, 得到 $r < \xi$ 范围内 $\lg G(r) - \lg r$ 曲线段的斜率 2α , 即得到 α 的值, 然后通过 (4) 式进一步计算得到 A1~A4 薄膜样品表面的分形维数分别为 2.69, 2.21, 2.42 和 2.48。

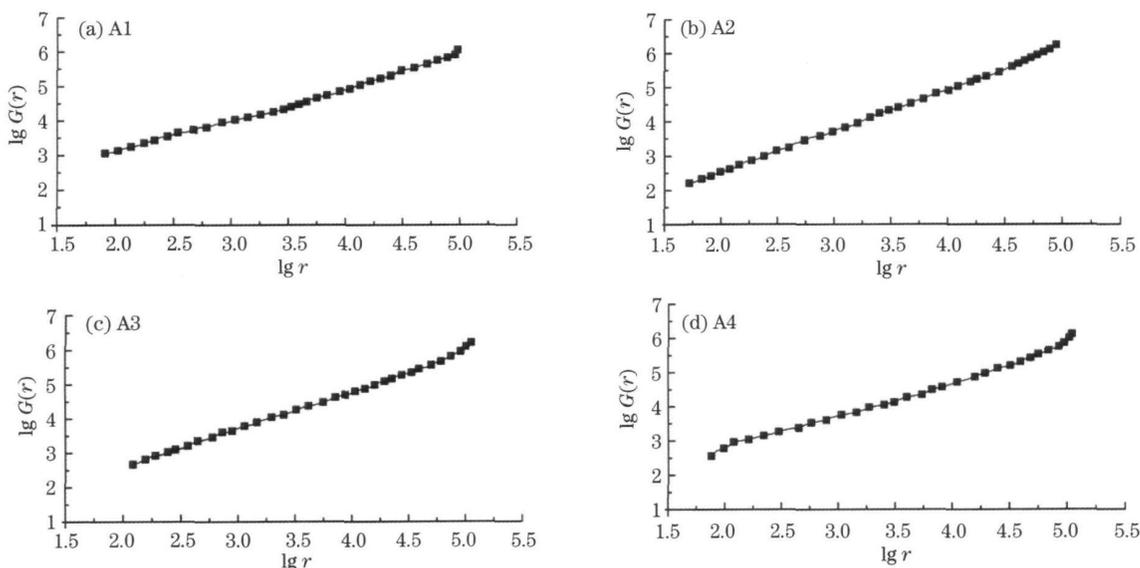


图 2 样品的表面高度相关函数曲线

Fig. 2 Surface height correlation function curve of samples

为了更加直观地反映薄膜样品表面的分形特征, 利用软件对薄膜表面的二维 AFM 图进行了自相关计算, 得到了如图 3 所示的不同薄膜样品表面的自相关图。

1) 样品 A1~A4 的分形维数变化趋势和薄膜表面粗糙度一样, 随温度呈先减小后增大的趋势。在未经退火处理时, 分形维数 $D = 2.69$ 为最大, 表明样品 A2 的表面几何形态较复杂; 当退火温度等于 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时, D 从 2.69 减小到 2.21, 这说明退火处理使薄膜表面呈现出更强的聚合性, 使得薄膜表面的结晶情况变好, 晶粒分布变均匀, 因此复杂程度降

低; 当退火温度增大到 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时, D 又开始增大到 2.42, 这是因为随着退火温度的提高, 颗粒进一步变大, 同时颗粒之间的空间也变大, 导致颗粒分布的规则性有所下降; 在退火温度为 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时分形维数进一步增大到 2.48, 这是因为退火温度过大时, 样品表面出现烧孔现象, 又会引起表面规则程度的下降。

2) 图 3 所示的自相关特性可以进一步证明, 薄膜未退火时, 其最小自相关区域明显要大于退火后的最小自相关区域, 说明此时薄膜的自相关特性较差; 而当退火温度为 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 最小自相关区域达到最小, 此时薄膜的自相关特性最好, 表面结晶最有规

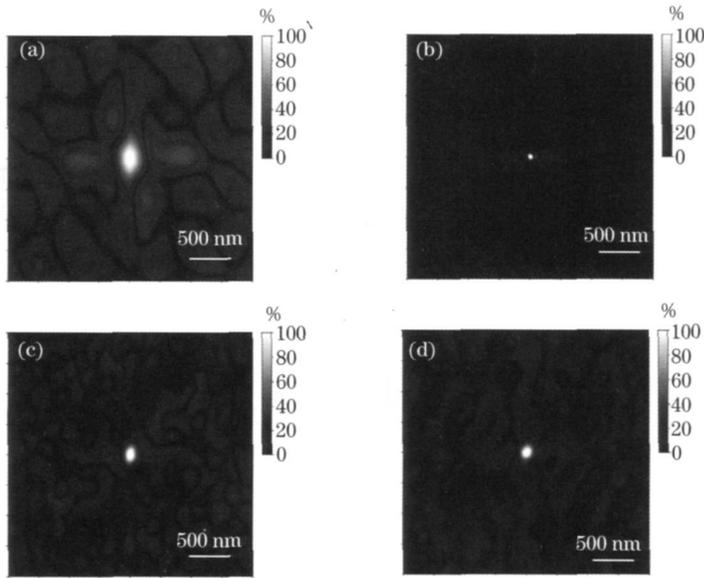


图 3 (a)~(d) 分别表示样品 A1~A4 的自相关图

Fig. 3 (a)~(d) respectively expresses the autocorrelation map of samples A1~A4

律,这与观察到的二维 AFM 图以及分形特性一致;随着退火温度的增加,最小自相关区域又逐渐增大,到 700 °C 时出现了明显的自相关区域连接现象,这与观察到的二维 AFM 图中的表面烧孔现象一致。

通常,薄膜表面形貌演化与表面扩散、晶粒长大及表面缺陷形成等机制是密切关联的^[11]。薄膜制备过程中,退火处理会同时增强薄膜表面的表面扩散能力和晶粒增长能力。表面扩散能力越强,由于表面势能差的驱动,意味着迁移粒子将优先向表面凹处等不规则区域进行迁移,这样就能够充分地填充薄膜表面的缺陷,这将导致表面形貌的平滑化,从而使得表面形貌趋于简化,形成规则的表面结构^[12],此时相应的分形维数 D 值就会减小,如样品 A2。晶粒长大则将导致薄膜表面形貌的高度起伏增加,同时使得高度起伏沿薄膜表面切向的分布趋于复杂化^[13],从而导致表面相应的分形维数 D 值的增加,如样品 A3。因此,薄膜表面形貌特征的演化取决于制备工艺过程中表面扩散能力和晶粒增长能力的强弱关系。另外,表面空洞、裂纹的形成将使得薄膜表面高度起伏加剧,因此缺陷形成也将增加表面形貌复杂化程度,降低表面质量,这些缺陷的几何形态特征比薄膜表面大晶粒山丘要复杂得多,如样品 A4 就出现了烧孔等明显的表面缺陷特征。

3 ZnO/TiO₂ 复合薄膜表面光散射特性实验

基于旋转波片法,设计了如图 4 所示的光路来

研究薄膜目标的散射特性。实验中采用的主要装置和仪器有:光学减振平台;632.8 nm(红光)HeNe 激光器,功率 1.5~2.0 mW;二向色性偏振片;1/2 波片;光具座:长度 50.0 cm,分度值 1 mm,底座质量 2.5 kg;数字式光照度计:量程有 200,2000 和 20000 lux 三档,三位半液晶显示;转动平台:转动角度 0°~360°,角度分辨率为 1'。

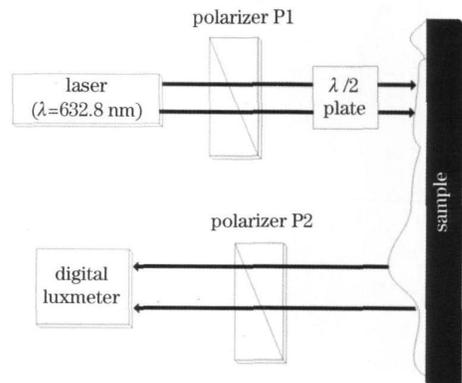


图 4 散射特性测量光路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optical path for light scattering properties measurement

由于整个实验持续的时间比较长,因此实验装置的稳定性是很重要的一个因素,为了保证实验装置的稳定性,所有的实验器件必须牢固。同时为了减小实验中背景的影响,整个实验在暗室中进行。当激光器发出的光入射到被测目标表面时,保证入射光线水平传播。光束垂直入射到目标时,目标表面的法线方向、入射光方向、旋转平台的零刻度三个

方向保持平行。

3.1 薄膜表面反射光强与入射角之间的关系

在进行反射光强的测量中,不需要考虑反射光的偏振态,因此,在实验中去掉示意图中照度计前面的检偏器,让转动平台在 $5^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 范围内改变,每隔 5° 测量一次,得到不同入射角时反射光强度的大小。图 5, 6 给出了当入射光分别为 632.8 nm 波长的 S 偏振光和 P 偏振光时, 4 种薄膜样品 A1~ A4 的反射光强度随入射角变化的关系。

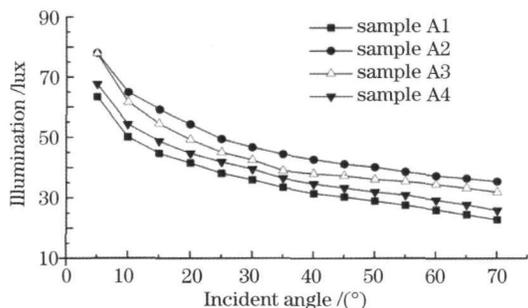


图 5 S 偏振光入射时,不同薄膜样品反射光强度与入射角之间的关系

Fig. 5 Relationship between intensity of reflected light and incident angle for different film samples when S polarized light is incident

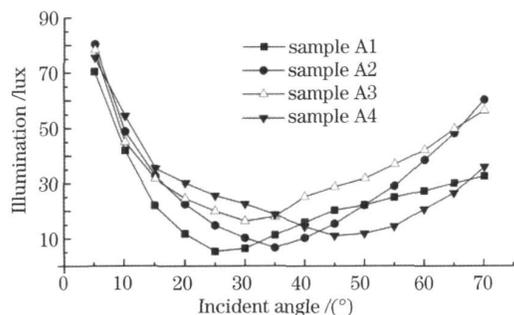


图 6 P 偏振光入射时,不同薄膜样品反射光强度与入射角之间的关系

Fig. 6 Relationship between intensity of reflected light and incident angle for different film samples when P polarized light is incident

当入射光为 S 偏振时,不同薄膜样品的反射光强度是入射角的单调递减函数,同时具有一定的规律,即样品表面的粗糙度越大,其在相同入射角下的反射光强越低。根据随机粗糙表面的散射理论可知,薄膜表面的散射能力主要受表面粗糙度和薄膜的吸收系数影响,由于入射光为 S 偏振光,因而在入射方向上没有电场分量,因此薄膜的吸收非常微弱,此时主要看表面粗糙度的大小,由于样品表面相对

入射光波长来说很光滑,其表面主要存在镜面反射,表面的粗糙度越小,镜面反射能力越强。

当入射光为 P 偏振时,不同薄膜样品的反射光强度随入射角先逐渐减小,当入射角达到某个临界角时,反射光强度又开始慢慢增大,这一现象说明利用电子束蒸发法制备得到的薄膜样品存在明显的布儒斯特现象,反射光强度出现最小值的位置即为“有效布儒斯特角”。样品 A1~ A4 的有效布儒斯特角分别为 25° , 35° , 30° 和 45° ,且在同一入射角下,反射光强与样品表面粗糙度不再出现规律性,这说明入射光为 P 偏振光时,薄膜对在入射方向上的电场分量产生了一定的吸收,这种吸收能力的大小与薄膜样品表面粗糙度之间不存在一定的线性关系,因而在相同入射角下,反射光强将同时由样品吸收能力和表面粗糙度决定,因而整体并未表现出明显的规律性。

3.2 薄膜表面反射光偏振度与入射角之间的关系

图 7, 8 分别给出了对应 632.8 nm 波长的 S 偏

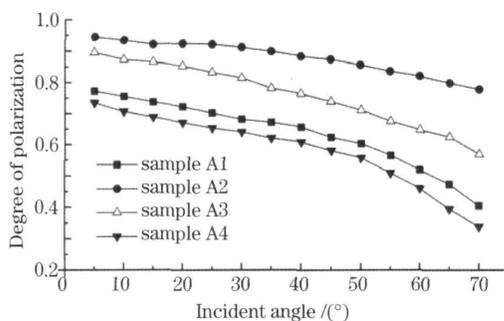


图 7 S 偏振光入射时,不同薄膜样品反射光偏振度与入射角之间的关系

Fig. 7 Relationship between polarization degree of reflected light and incident angle for different film samples when S polarized light is incident

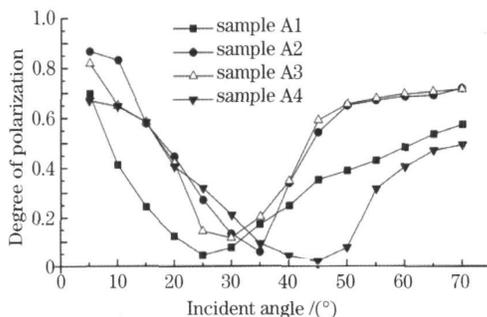


图 8 P 偏振光入射时,不同薄膜样品反射光偏振度与入射角之间的关系

Fig. 8 Relationship between polarization degree of reflected light and incident angle for different film samples when P polarized light is incident

振光和 P 偏振光时不同薄膜样品反射光偏振度与入射角之间的关系,对于不同偏振方向的入射光来说,其退偏振行为是不一样的。当入射线偏振光为 S 偏振时,反射光的偏振度随着入射角的增大缓慢地下降,但是整体的变化幅度很小,因此可认为 S 偏振光入射时,薄膜样品反射光的退偏现象很弱。但是,如果入射线偏振光为 P 偏振时,其退偏振行为是非常明显的。反射光的偏振度先随着入射角的增大而降低,当入射角接近某个角度时,反射光几乎变为自然光,其偏振度接近 0,然后随着入射角继续增大偏振度又开始增大,最后反射光又变为部分线偏振光。与此同时,对比图 8, 6 可以发现,最佳退偏振入射角与对应的有效布儒斯特角是相等的,这可以用样品中的多散射次数来进行解释:当入射角接近布儒斯特角时,薄膜表面的多散射次数最多,导致镜面反射能量损失最大,同时镜面反射中的线偏振光经过多次散射后转化成非偏振光的几率最大,因而导致偏振度最小。

4 结 论

采用离子源辅助电子束蒸发法制备了不同退火温度条件下的 ZnO/TiO₂ 复合薄膜。通过原子力显微镜对样品表面进行了形貌测量和统计规律分析。结果表明,通过电子束蒸发方式生成的 ZnO/TiO₂ 复合薄膜在不同的退火温度下得到的薄膜样品都具有比可见光波长量级小的表面高低起伏和粗糙度,因而可认为是具有不同粗糙度的弱散射随机粗糙表面。退火温度对薄膜样品的粗糙度、颗粒尺度以及分形特征具有显著的影响,随着退火温度的增加,样品表面的粗糙度下降,颗粒分布规则,分形特征明显,而当退火温度增加到一定程度时,样品表面出现烧孔现象,粗糙度又开始上升,颗粒分布杂乱,分形特征下降。综合考虑各种因素,最佳的退火温度应当介于 500 °C~ 600 °C 之间,控制好退火温度对制备特性良好的薄膜是很重要的。

基于旋转波片法搭建了实验光路,在暗室中对不同的薄膜样品进行了波长 632.8 nm 的激光散射特性实验,研究结果表明,不同薄膜样品的反射光强度和偏振度对不同偏振光具有不同的角度响应特征, S 偏振光入射时的反射光强度随入射角增大而减小,偏振度随入射角增大时的退偏现象很弱,在相同入射角下表面粗糙度大的样品反射光强较低,偏振度较弱; P 偏振光入射时的反射光强度随入射角增大存在布儒斯特现象,退偏振现象明显,最佳退偏

入射角对应有效布儒斯特角。结合薄膜表面统计特性对上述光散射特性进行了合理的解释。

对薄膜表面特性的研究,有助于更好地理解薄膜晶粒生长机制和改进薄膜制备工艺,对提高薄膜表面质量有一定的应用价值。分形理论作为研究薄膜表面的有效分析方法,在学术界越来越受到重视,薄膜分形应用研究可为相关领域的研究人员提供方法上的借鉴以及工程应用上的参考。此外通过光散射特性实验,也证明了 ZnO/TiO₂ 弱散射随机粗糙表面具有偏振选择和角度退偏作用,对激光通信等领域具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Du Jianzhou, Wang Dongsheng, Gu Zhigang *et al.*. Effects of an annealing treatment on photoluminescence of LaAlO₃ thin films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 294~ 298
- 杜建周, 王东生, 谷志刚等. 退火处理对 LaAlO₃ 薄膜发光特性的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 294~ 298
- 2 He Junpeng, Zhang Yueguang, Shen Weidong *et al.*. Optical properties of Al₂O₃ thin film fabricated by atomic layer deposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 277~ 282
- 何俊鹏, 章岳光, 沈伟东等. 原子层沉积制备 Al₂O₃ 薄膜的光学性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 277~ 282
- 3 Pan Yongqiang, Wu Zhensen, Hang Lingxia. Optical thin films interfaces roughness cross correlated properties and light scattering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 916~ 920
- 潘永强, 吴振森, 杭凌侠. 光学薄膜界面粗糙度互相关特性与光散射[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 916~ 920
- 4 B. B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature* [M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1982
- 5 A. Sanchez, R. Serna, F. Catalina *et al.*. Multifractal patterns formed by laser irradiation in GeAl thin multilayer films [J]. *Phys. Rev. B*, 1992, **46**(1): 487~ 490
- 6 Y. B. Park, S. W. Rhee. Growth and fractal scaling nature of copper thin films on TiN by metal organic chemical vapor deposition from hexafluoroacetylacetonate Cu^(II) vinyltrimethylsilane [J]. *J. Vacuum Sci. & Technol. A*, 1997, **15**(6): 1995~ 2000
- 7 G. Palasantzasa, J. T. M. De Hosson. Fractality aspects during agglomeration of solid phase epitaxy Co silicide thin films [J]. *J. Vacuum Sci. & Technol. B*, 2000, **18**(5): 2472~ 2476
- 8 Sun Xia, Xiong Gang, Fu Zhuxi *et al.*. Multifractal spectra of atomic force microscope images of ZnO film [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(5): 854~ 862
- 孙霞, 熊刚, 傅竹西等. ZnO 薄膜原子力显微镜图像的多重分形谱[J]. *物理学报*, 2000, **49**(5): 854~ 862
- 9 Sun Xia, Fu Zhuxi, Wu Ziqin. Multifractal calculation of thin film growth [J]. *Chinese J. Computational Physics*, 2001, **18**(3): 247~ 252
- 孙霞, 傅竹西, 吴自勤. 薄膜生长的多重分形谱的计算[J]. *计算物理*, 2001, **18**(3): 247~ 252
- 10 B. Eghball, G. W. Hergert, G. W. Lesoing *et al.*. Fractal Analysis of Spatial and Temporal Variability [M]. *Developments in Soil Science*. Amsterdam: Elsevier, 2000. 259~ 272
- 11 B. Okolo, P. Lamparter, U. Welzel *et al.*. The effect of deposition parameters and substrate surface condition on texture, morphology and stress in magnetron sputter deposited Cu thin films [J]. *Thin Solid Films*, 2005, **474**(F2): 50~ 63
- 12 M. Higo, K. Fujita, Y. Tanaka *et al.*. Surface morphology of metal films deposited on mica at various temperatures observed by atomic force microscopy [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2006, **252**(14): 5083~ 5099
- 13 S. H. Kang, Y. S. Obeng, M. A. Decker *et al.*. Effect of annealing on surface microstructural evolution and the electromigration reliability of electroplated Cu films [J]. *J. Electron. Mater.*, 2001, **30**(12): 1506~ 1512