

文章编号: 0258-7025(2009)01-0198-07

在反应磁控溅射过渡区制备高反射膜的工艺控制

张盛武¹ 黄 烽¹ 李 明¹ 宋秋明¹ 谢 斌¹ 王海千¹ 赵东锋² 陈 旻² 姜友松³ 宋亦周³

¹ 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室, USTC-Shincron 先进薄膜工艺材料联合实验室, 安徽 合肥 230026
² 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室, 化学物理系, 安徽 合肥 230026
³ Shincron 株式会社, 品川 东京 114-0011 日本

摘要 用反应磁控溅射法制备了 Ta_2O_5 和 SiO_2 的单层膜和多层高反射薄膜, 研究了在过渡区制备高质量光学薄膜的影响因素和机制, 探讨了制备高质量光学薄膜的工艺, 并引入了一种结合拟合方法的被动控制技术来实现在磁控溅射过渡区制备高质量的光学多层膜。结果表明, 在反应磁控溅射过渡区制备的光学薄膜不仅具有比氧化区更高的沉积速率, 而且具有更高的折射率和更低的光损耗。在过渡区镀制光学多层膜时速率的变化与溅射电压的漂移有关, 并且可以通过监测溅射电压随时间的变化结合拟合算法加以修正。在表面均方根粗糙度为 0.56 nm 的石英基片上, 采用过渡区镀膜和膜厚修正制备了 40 层的 Ta_2O_5/SiO_2 高反膜, 通过光腔衰荡光谱方法测得的反射率达到 99.96%。

关键词 薄膜; 反应磁控溅射; 过渡区; 高反膜

中图分类号 O484.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093601.0198

Process Control of High Reflectance Mirrors Preparation in Transition Region by Reactive Magnetron Sputtering

Zhang Shengwu¹ Huang Feng¹ Li Ming¹ Song Qiuming¹ Xie Bin¹
Wang Haiqian¹ Zhao Dongfeng² Chen Yang² Jiang Yousong³ Song Yizhou³

¹ USTC-Shincron Joint Laboratory for Advanced Thin Film Techniques & Materials, Hefei National Laboratory for Physical Science at Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China
² Hefei National Laboratory for Physical Science at Microscale, Department of Chemical Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China
³ Shincron Co., LTD., Shinagawa-Ku Tokyo 140-0011, Japan

Abstract Ta_2O_5 and SiO_2 single-layer films and multilayer high reflectance films have been prepared by reactive magnetron sputtering. Influences of the process parameters on the quality of optical films and the underlying mechanisms were studied. A passive control method based on fitting the optical spectra can effectively improve the quality of the multilayer films prepared in the transition region. Results indicate that in addition to the high deposition rate, films deposited in the transition region also have higher refractive index and lower optical losses, compared with those deposited in the oxide region. The changes of the deposition rates during the deposition process of a multilayer film in the transition region depend on the changes of the sputtering voltage, which can be compensated with the fitting method by monitoring the sputtering voltages. 40-layer Ta_2O_5/SiO_2 high reflectance films were prepared in the transition region on fused silica substrate, which has a surface roughness of 0.56 nm. The reflectance of these mirrors reaches 99.96% as measured by cavity ring-down spectroscopy.

Key words thin films; reactive magnetron sputtering; transition region; high reflectance films

收稿日期: 2008-01-18; 收到修改稿日期: 2008-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(50772109)资助项目。

作者简介: 张盛武(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事磁控溅射薄膜工艺与薄膜光损耗研究。

E-mail: zhshw@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 王海千(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事薄膜材料与物理研究。E-mail: hqwang@ustc.edu.cn

1 引言

高反膜被广泛用于高功率激光系统^[1]中。高性能的多光束干涉仪^[2]以及激光器谐振腔^[3,4]的高反膜,要求更高的反射率和更低的损耗。因此,发展与设计光谱尽可能符合以及光学损耗尽可能低的光学镀膜技术非常重要。

磁控溅射制备的光学薄膜具有致密性好、光损耗低以及附着力高等优点^[5~7]。在反应磁控溅射镀膜中,随着通入的反应气体(如氧气)量的增加,溅射靶表面的状态会发生由金属区、过渡区到氧化区的变化,同时薄膜的沉积速率也会相应地发生大幅度的变化^[5,6,8,9]。在氧化区镀膜虽然沉积速率稳定,工艺重复性高,但由于靶中毒导致了溅射速率慢,且薄膜的光学性质也不是最优的^[5]。将工作点调整到过渡区,可以获得具有理想化学计量比和更高堆积密度的高质量光学薄膜,同时薄膜的沉积速率也可以得到极大的提高。但是由于溅射靶表面的状态不稳定,溅射速率、气体分压和溅射电压等参数变化很陡峭^[5,8,9]。解决过渡区镀膜的方法主要有主动控制和被动控制两个途径。主动控制即通过监测镀膜过程中某个参量的变化,并通过反馈调节镀膜的工艺参数使镀膜过程的工作点稳定在过渡区的某一点附近。目前所采用的检测参量主要有氧气分压、阴极电压和等离子体发射光谱等,而反馈控制的工艺参数主要有氧气的导入量和溅射功率等^[5,6,8]。主动控制技术虽然可以在一定程度上提高镀膜的控制精度,但需要额外的附加设备从而提高镀膜的成本。高质量的光学薄膜在沉积过程中引入的沿膜厚方向分布的不均质也会对薄膜的光学特性产生重要的影响^[10]。

本文以 Ta₂O₅/SiO₂ 高反膜为例,研究了在过渡区制备高质量光学薄膜的影响因素和机制,探讨了制备高质量光学薄膜的工艺,并介绍了一种结合拟合方法的被动控制技术来实现在磁控溅射过渡区制备高质量光学多层膜。

2 实验

采用日本 Shincron 公司生产的中频反应磁控溅射设备(ASC-800)。Ta₂O₅ 单层膜分别沉积在 K9 玻璃和石英衬底上,石英衬底的表面均方根(RMS)粗糙度约为 0.2 nm。Ta₂O₅/SiO₂ 多层膜分别沉积在 K9 玻璃和平凹型的高反膜衬底上。溅射靶材为金属钽靶和硼掺杂的多晶硅靶(纯度均为

99.95%),溅射功率分别为 4 kW 和 3 kW,溅射前本底真空度优于 2.0×10^{-4} Pa。以 Ar 为溅射气体,O₂ 为反应气体。Ar 和 O₂ 的流速分别由两个质量流量控制器控制,保持真空腔内氩、氧流速之和为 200 sccm。

薄膜的反射和透射光谱数据由一台带积分球的紫外-可见-近红外分光光度计(Hitachi 公司,U-4100)来测量。测量的波长范围为 350~850 nm,测量光入射角为 5°,用包络法得到膜厚及光学常数。不透明薄膜的膜厚从扫描电子显微镜(SEM)(JSM-6700F)图像获得,沉积速率是由膜厚除以沉积时间得到的。

样品的表面形貌用日本精工型号为 SPA300HV 的原子力显微镜(AFM)在大气条件下观测,薄膜的表面均方根粗糙度由动态力显微镜(DFM)模式得到的表面形貌图像数据计算得出。在 DFM 测量过程中,在样品的三个不同区域扫描,扫描面积为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,薄膜表面均方根粗糙度由三次扫描得到的表面均方根粗糙度取平均。

制备的 Ta₂O₅/SiO₂ 高反膜的反射率用光腔衰荡光谱(CRDS)技术^[11]测量。光腔衰荡光谱方法测量的是光强随时间的衰减波形,然后拟合光子的衰减寿命,避免了激光输出能量的起伏引起的误差。对于真空腔,光子的衰减寿命 τ 可以表示为

$$\tau = \frac{L}{c} \times \frac{1}{1-R}, \quad (1)$$

式中 L 为反射镜间距, c 为光速, R 为反射率。光子的衰减寿命 τ 仅依赖于腔镜的反射率,由此可以通过测量光子的衰减寿命 τ 精确得到高反膜的反射率。实验采用的光腔衰荡光谱实验装置为直型不锈钢腔体,腔长为 0.84 m,腔内抽真空,真空度优于 0.1 Pa。镀有高反膜的镜片平行固定于光腔两端,构成光学谐振腔。光源为 Nd:YAG 激光器(Spectra Physics, GCR-170, 10 Hz)抽运的可调谐染料激光器(Sirah),输出激光脉宽 8 ns,线宽 0.07 cm^{-1} 。染料激光经过 $\phi 100 \mu\text{m}$ 针孔空间滤波后进入光腔,光腔衰荡信号由放在腔镜后的光电倍增管(Hamamatsu, R1463)接收后经 A/D 转换,然后送入计算机处理。

3 结果与讨论

图 1(a)所示为钽氧化物薄膜沉积速率和平均溅射电压随氧气流速的变化关系。当氧流速(OFR)小于 65 sccm 时,所获得的样品为氧化不完全

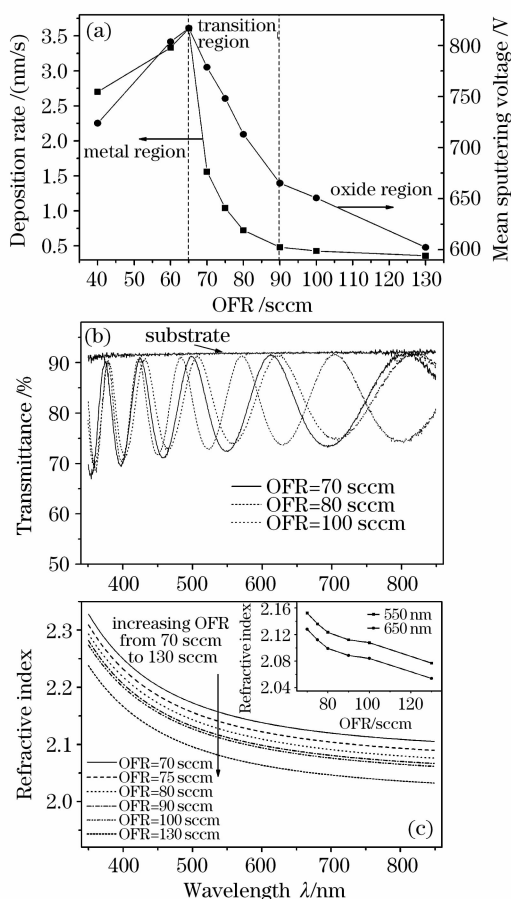


图1 单层钽氧化物薄膜的沉积参数和光学性质随 OFR 的关系。(a) 沉积速率和平均溅射电压;(b) 透射光谱;(c) 折射率色散关系,内嵌图是在 550 nm 和 650 nm 处的折射率

Fig.1 Deposition parameters and optical properties of single-layer tantalum oxide films as a function of oxygen flow rate (OFR). (a) deposition rate and mean sputtering voltage; (b) transmittance spectra; (c) dispersion curves. The insert shows the refractive index of the films at wavelength of 550 nm and 650 nm

的黑色不透明薄膜。这时溅射过程处于金属区,沉积速率随 OFR 的增加主要是薄膜中的氧含量增加的结果^[12]。OFR 介于 65~90 sccm 的区域为过渡区,这时薄膜的沉积速率随着 OFR 的增加急剧下降,溅射靶的表面也从金属态向氧化态转变。进一步增加 OFR 将使溅射过程进入氧化区,溅射靶表面几乎完全被氧化,溅射速率也变得很慢。由 OFR 变化导致的溅射靶表面氧化状态的改变不仅影响溅射速率,也会影响到平均溅射电压,二者的变化规律非常相似。这种溅射电压随 OFR 的增加而先增大后减小的变化趋势也在其他研究小组的工作中被观察到^[5,13]。

图 1(b)所示为在不同 OFR 下制备的 Ta_2O_5 薄膜以及基片的透射光谱。衬底为 K9 玻璃,薄膜厚度处于 600~660 nm 之间。从图 1(b)可以看出,在过渡区和在氧化区制备的 Ta_2O_5 薄膜都完全透明,而且透过率的极大值非常接近空白基片的透过率,说明薄膜的吸收非常小。结合反射率光谱分析可知在过渡区和氧化区获得的 Ta_2O_5 薄膜在可见光区的消光系数约为 1×10^{-4} 。X 射线衍射 (XRD) 和 SEM 的结果表明,所获得的 Ta_2O_5 薄膜均为非晶态薄膜,薄膜中观察不到柱状结构或其他缺陷的存在。

图 1(c)所示为不同 OFR 制备的 Ta_2O_5 的折射率色散关系,其中内嵌图是在 550 nm 和 650 nm 处 Ta_2O_5 的折射率随氧流速的变化。从图 1(c)看出,随氧流速的减小,折射率变大。这是因为随着氧流速减小,溅射电压增加,导致轰击衬底表面的粒子的能量增加,到达衬底的沉积物具有更大的动能,使得沉积的薄膜更加地致密。

图 2 所示为在过渡区(OFR 为 70 sccm)和氧化区(OFR 为 100 sccm)沉积的 Ta_2O_5 薄膜的原子力显微镜表面形貌图像。膜厚分别为 623.6 nm 和 612.7 nm。分析可知,在过渡区沉积的 Ta_2O_5 薄膜的表面均方根粗糙度为 0.18 nm,在氧化区的为 0.24 nm,衬底是表面均方根粗糙度约为 0.2 nm 的

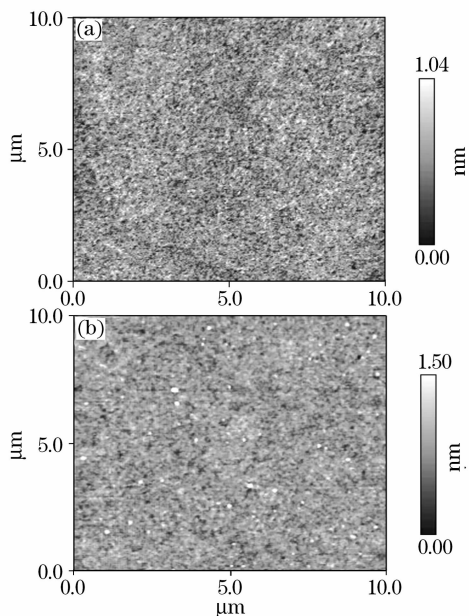


图2 不同条件下沉积的 Ta_2O_5 薄膜的 AFM 表面形貌图像。(a) 过渡区;(b) 氧化区
Fig.2 AFM surface morphology of the Ta_2O_5 thin films prepared under different deposition conditions.
(a) transition region; (b) oxide region

石英玻璃。在氧化区镀制的 Ta_2O_5 薄膜的表面有许多小的颗粒物。这些颗粒物容易造成光散射,影响薄膜的光学性质。当溅射过程处于氧化区时,靶面氧化程度较高,在靶材表面形成的氧化物膜容易导致异常放电,引起靶材料在局部融化、蒸发,甚至喷射^[6]。而过渡区靶表面氧化程度相对较低,可以在很大程度上抑制薄膜表面颗粒物的产生。

从以上的结果可以看出,在过渡区制备的 Ta_2O_5 薄膜,不仅具有较高的沉积速率和堆积密度,而且具有较低的表面粗糙度。可以预期在过渡区制备的光学多层膜具有较好的光学特性。

较高的衬底温度有利于形成致密的光学薄膜;在溅射过程中减小衬底温度的变化还可以减小薄膜的不均质^[10,14]。镀膜前的烘烤可以使吸附在真空室壁及基片上的水气脱附,减少薄膜中的杂质含量。鉴于烘烤和衬底温度对减小薄膜光损耗和不均质的重要作用,本文后面的多层高反射膜都是在预先烘烤和加热衬底条件下制备的。

选择在过渡区溅射 Ta_2O_5 薄膜制备高反射多层膜,并采用 SiO_2 作为低折射率材料。 SiO_2 是一种吸收非常低的材料(在 630 nm 处,折射率约为 1.46,消光系数小于 10^{-4})^[15]。为了保持镀膜设备沉积多层膜的过程连续性,在溅射 SiO_2 时将氧气和氩气的流速与镀 Ta_2O_5 时的相同,这时 SiO_2 的溅射工作点处于氧化区。下面提到的过渡区和氧化区都是对于 Ta_2O_5 而言的。

图 3 所示为在过渡区(ORF 为 70 sccm)制备的 Ta_2O_5/SiO_2 30 层高反膜((HL)~15)的设计和测量的反射光谱,其中每层 Ta_2O_5 的沉积时间为 44.6 s, SiO_2 的沉积时间为 175 s。测量和设计的高反膜反射光谱之间存在很大的差异:反射带两边旁瓣的波峰

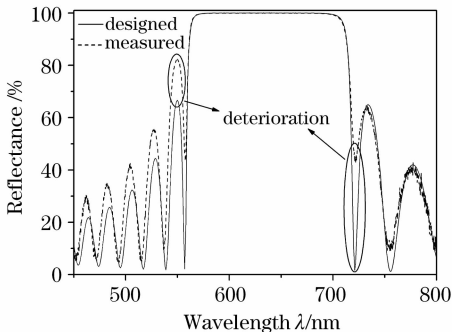


图 3 在过渡区制备的 30 层高反膜测量以及设计的反射光谱

Fig. 3 Measured and designed reflectance spectra of the 30-layer high reflectance film prepared in the transition region

和波谷与设计的不重合。这是由于实际制备的膜系偏离设计膜系引起的。在过渡区镀膜,靶的表面状态不稳定,导致溅射速率和溅射电压等容易随着时间而改变。

图 4 是在过渡区(ORF 为 70 sccm)制备 Ta_2O_5 单层膜时溅射电压随沉积时间的变化关系。在溅射开始时,溅射电压迅速增加,并且在经过一段时间后趋于平稳。在溅射多层膜时,这种溅射电压的不稳定性可以通过预溅射加以改善。在制备图 3 中的多层膜时,设定的每层膜的预溅射时间为 60 s。

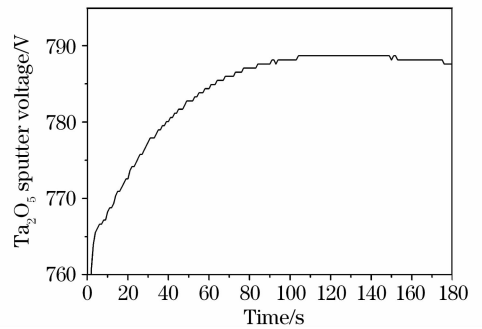


图 4 在过渡区制备的 Ta_2O_5 单层膜的溅射电压随沉积时间的变化关系

Fig. 4 Variation of the sputtering voltage during the deposition of single-layer Ta_2O_5 film in the transition region

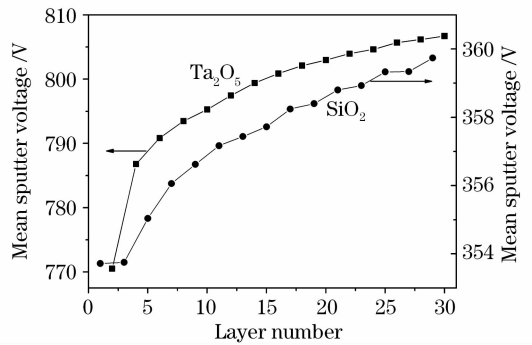


图 5 30 层 Ta_2O_5/SiO_2 高反膜的各层平均溅射电压随层数的变化

Fig. 5 Variation of the mean sputtering voltage relative to the layer numbers during the deposition of the 30-layer high reflectance films

在溅射多层膜时,各层膜的平均溅射电压也会随着溅射时间增长和层数的增加而明显地增加。图 5 所示为在过渡区制备的 Ta_2O_5/SiO_2 30 层高反膜各层平均溅射电压随层数的变化。这种大时间尺度的溅射电压的变化除了会引起各层薄膜的堆积密度发生变化外,也会使薄膜的溅射速率发生改变,导致实验制备的多层膜中各层的光学厚度偏离原始设计

值,使膜系的光谱偏离设计光谱。图 3 中反射带两边旁瓣的波峰与波谷与设计光谱的偏差就是因此而起的。

为了解决磁控溅射过渡区制备多层膜时溅射过程不稳定引起的多层膜光谱劣化的问题,对镀膜条件进行严格的控制。如每次镀膜前维持真空度不变,保持烘烤和加热时间相同等,以减少不同次实验中沉积速率的随机性变化。图 6 为在严格控制镀膜条件下,连续两次制备 30 层高反膜过程中溅射电压随层数的变化。从图中可以看出,两次制备多层膜过程中溅射电压随层数的变化基本重合。因为沉积速率与溅射电压的变化是相关的,所以严格控制镀膜条件可以有效地抑制多层膜制备过程中沉积速率的随机变化。

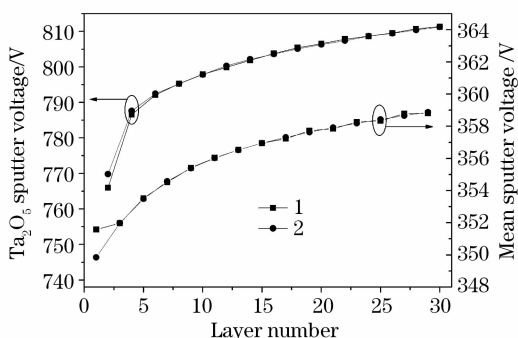


图 6 在严格控制镀膜条件下,连续两次制备多层膜的过程中溅射电压随层数的变化

Fig. 6 Variation of the mean sputtering voltage relative to the layer numbers during twice continuous deposition of the 30-layer high reflectance film under critical deposition conditions

在有效抑制沉积速率随机变化的基础上,以 30 层高反膜为例,采用以下方法对各层膜厚的系统偏差加以修正。首先,用 (HL) $\sim n$ ($n = 15$) 膜系的设计光谱通过调整中心波长位置来初步拟合测量光谱,将得到的高低折射率层膜厚设定为膜的中间两层的厚度;然后,对同种薄膜材料,采用沉积速率与平均溅射电压的线性近似关系(参见图 1(a)),并设对应于单位平均溅射电压变化的高低折射率材料的膜厚变化量分别为 δ_H 和 δ_L ,则各层薄膜的厚度可以表示为

$$d_{i,j} = d_{i,m} + \delta_i(V_{i,j} - V_{i,m}), \quad (2)$$

式中 d, V 分别为膜厚与平均溅射电压,下标 i 为 H(高折射率材料)或 L(低折射率材料),下标 j 为薄膜的层数,下标 m 表示中间层。通过将图 6 的电压变化代入(2)式并拟合 δ_i ,即可得出该膜系光学膜厚的归一化分布如图 7 所示。由此可计算出各层实际的

平均沉积速率;最后,用时间补偿的方法^[16],实现 (HL) $\sim n$ 膜系的制备。

图 8 是经拟合修正后制备的中心波长为 630 nm 的 30 层高反膜测量(短线)的反射光谱与设计(实线)的反射光谱的比较。30 层高反膜的测量光谱与设计光谱在反射带以及旁瓣的峰值都很好地重合。

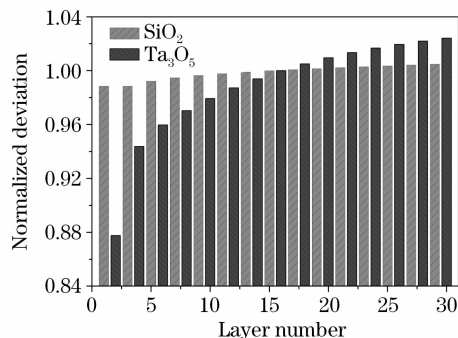


图 7 拟合得到的 30 层高反膜归一化的光学膜厚分布
Fig. 7 Normalized optical thicknesses by fitting the spectrum of the 30-layer high reflectance film

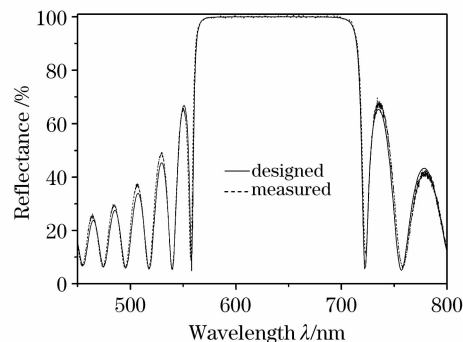


图 8 中心波长为 630 nm 的 30 层高反膜的设计和测量的反射光谱

Fig. 8 Designed and measured reflectance spectra of the 30-layer high reflectance film with the centre wavelength of 630 nm

图 9 是采用上述膜厚修正方法分别在过渡区和氧化区制备的中心波长为 630 nm 的 40 层 Ta_2O_5/SiO_2 高反膜的光腔衰减信号曲线,测量的激光波长为 648 nm。对于在过渡区制备的高反膜,拟合得到衰减时间 τ 为 7.4097 μs ,对应高反膜的反射率 $R = 99.962\%$ 。在氧化区制备的高反膜拟合得到衰减时间 τ' 为 2.9945 μs ,对应高反膜的反射率 $R' = 99.907\%$ 。

图 10 所示为在过渡区和氧化区制备的高反膜的反射率随激光波长的变化曲线。从图 10 可以清楚地看出,在过渡区制备的高反膜比在氧化区制备的具有更高的反射率和更低的光损耗。

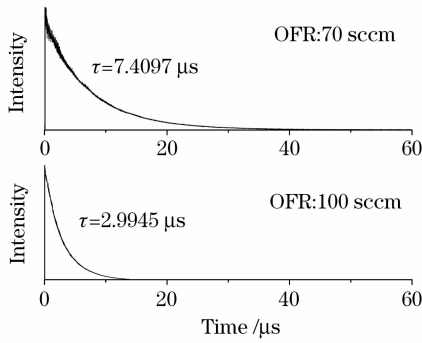


图9 过渡区和氧化区制备的高反膜的典型衰减曲线 ($\lambda = 648 \text{ nm}$)

Fig. 9 Ring-down temporal profiles ($\lambda = 648 \text{ nm}$) of the high reflectance films prepared in the transition region and oxide region respectively

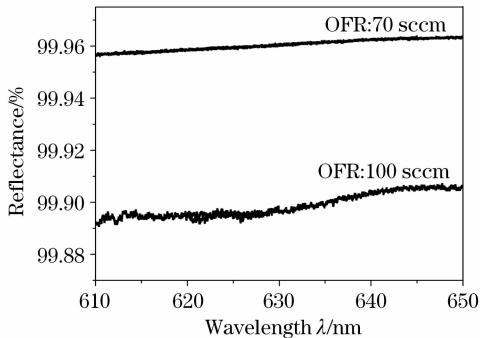


图10 在过渡区和氧化区制备的高反膜反射率随激光波长的变化曲线

Fig. 10 Reflectance as a function of laser wavelengths of the high reflectance films prepared in the transition region and oxide region respectively

引起高反膜光损耗的另一个重要因素是衬底表面的粗糙度导致的散射^[17], Cho等^[17]用离子束溅射沉积35层 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 高反膜,发现衬底粗糙度由0.17 nm增加到0.34 nm时,沉积在其上的高反膜的总积分散射(TIS)迅速增大。并由此提出了制备低损耗高反膜的衬底表面粗糙度应该小于0.2 nm。图11是购买的用于沉积高反膜的石英衬底的AFM表面形貌图像。分析可知,表面均方根粗糙度为0.56 nm。根据光学表面的散射量理论,表面粗糙度引起的总积分衍射(TIS)可以表述为^[18]

$$\text{TIS} = \left(\frac{4\pi\delta\cos\theta}{\lambda} \right)^2, \quad (3)$$

式中 δ 为表面均方根粗糙度, λ 为入射光的波长, θ 为入射角度。这样在632.8 nm处,基片表面粗糙度引起的TIS为 123.7×10^{-6} ;同时根据CRDS的测量,高反膜总的光损耗(散射和吸收)约为 390×10^{-6} 。Rempe等^[19]利用离子束溅射沉积技术在超光滑的

石英衬底(表面均方根粗糙度小于0.1 nm)上沉积的40层高反膜反射率已经超过99.999%。因此为了制备具有更高反射率的高反膜,除了需要对镀膜过程进行精确的控制以外,还需要具有更低表面粗糙度的衬底。

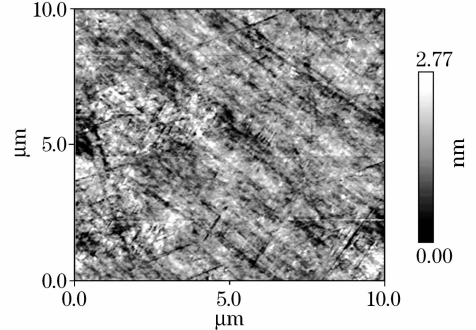


图11 用于沉积高反膜的基片的AFM表面形貌图像
Fig. 11 AFM surface morphology of the substrate used for depositing high reflectance film

4 结论

在反应磁控溅射过渡区制备的光学薄膜不仅具有比氧化区更高的沉积速率,而且具有更高的折射率和更低的光损耗。在过渡区镀制光学多层膜时膜厚的变化与溅射电压的漂移有关,并且可以通过监测溅射电压随时间的变化结合拟合算法加以修正。在表面均方根粗糙度为0.56 nm的石英基片上,采用过渡区镀膜和膜厚修正制备了40层的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 高反膜,通过光腔衰荡光谱方法测得的反射率达到99.96%。介绍的方法也可以推广应用于其他膜系的光学薄膜。

参 考 文 献

- Shi Zhaohui, Fan Zhongwei, Zhang Ying *et al.*. High efficiency and high power all-solid-state ultraviolet laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):29~32
石朝辉,樊仲维,张 瑛等. 高效率大功率全固态紫外激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):29~32
- Lu Honggang, Jiang Yanyi, Bi Zhiyi. Measurement of reflectivity of optical mirrors using laser phase modulation and fineness of Fabry-Perot cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12):1675~1679
鲁刚刚,蒋燕义,毕志毅. 激光相位调制法布里-珀罗腔精细度法测定反射率[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12):1675~1679
- Wang Chunmei, Li Jiong, Gong Tianlin *et al.*. Determination of the absolute absorption cross section of oxygen forbidden transition by cavity ring down spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11):2087~2090
王春梅,李 炯,龚天林等. 腔衰荡光谱技术测量 O_2 禁戒跃迁绝对吸收界面[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11):2087~2090
- Wu Jianqiang, Tang Xiahui, Qin Yingxiong *et al.*. 90° conical reflector resonator for high power transverse flow CO_2 laser

- [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):628~632
 武建强,唐霞辉,秦应雄等. 高功率横流 CO₂ 激光器的锥面反射镜谐振腔[J]. 中国激光, 2007, **34**(5):628~632
- 5 W. D. Sproul, D. J. Christie, D. C. Carter. Control of reactive sputtering processes [J]. *Thin Solid Films*, 2005, **491**:1~17
 - 6 Mao Xinhui, Chen Guoping, Cai Bingchu. Advance in reactive magnetron sputtering [J]. *Vacuum*, 2001, **4**:1~7
 茅昕辉,陈国平,蔡炳初. 反应磁控溅射的进展[J]. 真空, 2001, **4**:1~7
 - 7 Zheng Dingwei, Ni Sheng, Zhao Qiang *et al.*. Structure and optical properties of ZnO films DC reactively sputtered at different oxygen partial pressure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):739~743
 郑丁葳,倪晟,赵强等. 不同氧分压下直流反应溅射 ZnO 薄膜的结构和光学特性[J]. 光学学报, 2007, **27**(4):739~743
 - 8 S. M. Rossnagel. Thin film deposition with physical vapor deposition and related technologies [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 2003, **21**(5):S74~S87
 - 9 Yan Hong, Zhao Futing. Advances in reactive magnetron sputtering (RMS) applied on optical coating [J]. *Opt. Instrument*, 2004, **26**(2):109~114
 闫宏,赵福庭. 光学薄膜领域反应磁控溅射技术的进展[J]. 光学仪器, 2004, **26**(2):109~114
 - 10 Fachun Lai, Ming Li, Haiqian Wang *et al.*. Substrate temperature effect on the refractive index and a two-step film method to detect small inhomogeneities in optical films [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(29):6181~6185
 - 11 Sun Fuge, Dai Dongxu, Xie Jinchun *et al.*. Accurate reflectivity measurement of high reflective mirrors via a cavity ring-down method [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(1):35~38
 孙福革,戴东旭,解金春等. 用光腔衰荡光谱方法精确测量高反镜的反射率[J]. 中国激光, 1999, **A26**(1):35~38
 - 12 A. Yamamoto, Y. Abe, M. Kawamura *et al.*. Effects of oxygen gettering and target mode change in the formation process of reactively RF sputtered WO₃ thin films [J]. *Vacuum*, 2002, **66**:269~273
 - 13 M. A. Lewis, D. A. Glocker, J. Jorne. Measurement of secondary electron emission in reactive sputtering of aluminum and titanium nitride [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 1989, **7**(3):1019~1024
 - 14 Fachun Lai, Yong Wang, Ming Li *et al.*. Determination of optical constants and inhomogeneity of optical films by two-step envelope method [J]. *Thin Solid Film*, 2007, **515**:4763~4767
 - 15 Fachun Lai, Ming Li, Haiqian Wang *et al.*. Effect of oxygen flow rate on the properties of SiO_x films deposited by reactive magnetron sputtering [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(8):490~493
 - 16 H. X. Liu, S. M. Xiong, L. H. Li *et al.*. Variation of the deposition rate during ion beam sputter deposition of optical thin films [J]. *Thin Solid Films*, 2005, **484**:170~173
 - 17 H. J. Cho, M. J. Shin, J. C. Lee. Effects of substrate and deposition method onto the mirror scattering [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(7):1440~1446
 - 18 Hou Haihong, Fan Zhengxiu, Shao Jianda *et al.*. Scalar scattering theory of optical surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(11):35~38
 侯海虹,范正修,邵建达等. 光学表面的标量散射理论[J]. 激光与光电子学发展, 2005, **42**(11):35~38
 - 19 G. Rempe, J. Thompson, H. J. Kimble. Measurement of ultralow losses in an optical interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **17**(5):363~365