

文章编号: 0258-7025(2010)04-1108-06

离子束后处理对 TiO₂ 薄膜表面粗糙度的影响

潘永强^{1,2} 杭凌侠¹ 吴振森² 王浩浩¹

(¹ 西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032)
(² 西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 利用电子束热蒸发技术在两种不同粗糙度的 K9 玻璃和一批单晶硅基底上沉积了单层二氧化钛 (TiO₂) 薄膜, 并对这些样片进行了氧离子后处理。采用泰勒-霍普森相关相干表面轮廓粗糙度仪 (Talysurf CCI) 分别对基底以及样片处理前后的表面粗糙度进行了研究, 并用椭圆仪对离子处理前后的 TiO₂ 薄膜的折射率进行了测量。实验结果表明, TiO₂ 薄膜对于基底具有一定的平滑作用; 当基底粗糙度较大时, 随着轰击离子能量的增加样片的表面粗糙度先减小后增加; 当氧离子的轰击时间增加时, 薄膜表面粗糙度会明显降低, 随着轰击离子束流密度的增加, 薄膜表面的粗糙度减小的幅度会增加。

关键词 薄膜; 二氧化钛; 表面粗糙度; 离子束后处理; 椭圆仪

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.1108

Influence of Ion Beam Post-Treatment on Surface Roughness of TiO₂ Thin Films

Pan Yongqiang^{1,2} Hang Lingxia¹ Wu Zhensen² Wang Haohao¹

(¹ School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China)
(² School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Titanium dioxide (TiO₂) thin films are deposited on two different roughness K9 glass and monocrystalline silicon substrates by electron beam evaporation technique and all samples are treated with oxygen ion beam. Surface roughness of substrates and all samples are measured using Talysurf CCI. The refractive index of TiO₂ thin films is measured by an ellipsometer. The experimental results show that TiO₂ thin films decrease the substrate surface roughness, and ion beam post-treatment improves the surface roughness of TiO₂ thin films. When the substrate roughness is larger, with the increase of ion energy, the surface roughness of TiO₂ thin films decreases firstly, and then increases; with the increase of ion beam bombardment time, the surface roughness of TiO₂ thin films decreases obviously. With the increase of ion beam density, the surface roughness of TiO₂ thin films decreases. The surface roughness of all samples is also decreased with ion beam treatment.

Key words thin films; titanium dioxide; surface roughness; ion beam post-treatment; ellipsometer

1 引 言

二氧化钛 (TiO₂) 在可见和近红外波段范围内具有较高的折射率和较高的介电常数以及良好的化学稳定性和机械性能, 在光学薄膜中得到广泛的应用。然而在实际应用中, 由于 TiO₂ 薄膜的表面粗糙度造成的光散射损耗影响着薄膜的许多特性。如

在高精度激光陀螺系统中, 由于薄膜表面粗糙度引起的激光背向散射会使散射光在激光陀螺谐振腔内产生背向散射谐振, 从而影响激光陀螺的正常工作^[1~3]。在相干光学系统中, 由于薄膜表面粗糙度引起的散射光降低了系统的对比度, 严重时可以使系统性能降低到无法正常工作^[4,5]。因此, 研究

收稿日期: 2009-06-26; 收到修改稿日期: 2009-08-17

基金项目: 国家自然科学基金 (60878032) 资助课题。

作者简介: 潘永强 (1974—), 男, 博士研究生, 主要从事光学薄膜工艺和光学薄膜散射特性的研究。

E-mail: pyq_867@163.com

导师简介: 吴振森 (1946—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事随机介质、非均匀介质以及光学薄膜中电磁 (光) 波的传播与散射、目标激光散射特性和电磁散射特性等方面的研究。E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

TiO₂ 薄膜的表面粗糙度,探索改善 TiO₂ 薄膜表面粗糙度的方法,对于制备超光滑、低散射损耗的高质量光学薄膜具有重要的现实意义。光学薄膜的表面粗糙度主要由两部分组成,一种是由于基底表面粗糙度在薄膜表面复现而产生的非固有粗糙度;另一种是薄膜生长过程中产生的固有表面粗糙度^[6]。对于薄膜的非固有粗糙度主要靠降低基底的表面粗糙度来实现,而对于薄膜生长过程中产生的固有粗糙度,主要和薄膜的沉积技术、沉积工艺等条件有关^[7,8]。目前,国内外对于光学薄膜表面粗糙度的研究主要有散射法、干涉法、探针法以及原子力显微镜(AFM)等^[9~11]。如国外的 M. C. Salvadori 等^[12]采用 AFM 研究了不同厚度下 DLC 薄膜的表面粗糙度。国内中国科学院上海光学精密机械研究所的侯海虹等^[4]采用总积分散射仪研究了二氧化锆薄膜以及光学基底的表面粗糙度。文献^[13]采用表面轮廓粗糙度仪研究了不同粗糙度基底以及不同厚度的二氧化锆薄膜表面粗糙度。文献^[14]利用光散射的理论,用总背向散射研究了膜层厚度、基底粗糙度等对 TiO₂ 薄膜表面粗糙度的相关性的影响。而有关离子束后处理对光学薄膜特性影响的文献也较多^[15],但离子束后处理对光学薄膜表面粗糙度的影响研究却很少。

本文首先采用电子束热蒸发技术在基底粗糙度分别约为 1.95 和 1.12 nm 的 K9 玻璃以及粗糙度约为 0.55 nm 的一批单晶硅基底上,采用相同工艺条件,一次性沉积了厚度相同的单层 TiO₂ 薄膜,然后对这些 TiO₂ 薄膜样片进行离子束轰击后处理,采用表面粗糙度轮廓仪分别研究了离子束轰击前后 TiO₂ 薄膜样片的表面粗糙度。给出了离子束轰击的离子能量、离子束轰击时间和离子束流密度等参数对 TiO₂ 薄膜表面粗糙度的影响。用椭偏仪测量和不同离子后处理的 TiO₂ 薄膜的折射率,并给出了离子处理前后 TiO₂ 薄膜表面的三维形貌图。

2 实 验

2.1 基底和薄膜样片的获取

实验中所用的 K9 玻璃基底是直径为 20 mm,厚度为 2 mm 的平板玻璃,单晶硅基底的厚度为 1 mm。为了使每组样片镀膜后薄膜的表面粗糙度一致,镀膜前首先采用表面粗糙度轮廓仪对清洗后的基底表面粗糙度进行测量,从众多基底中找出表面粗糙度相等或近似相等的基底以便后续的镀膜和后处理实验中使用。实验中基底以及离子束处理前后

TiO₂ 薄膜表面粗糙度的测量仪是英国泰勒-霍普森有限公司生产的 Talysurf CCI 白光干涉表面轮廓仪。其纵向分辨率可达 0.1 nm,测试面积为 0.8 mm×0.8 mm。表面粗糙度测量中,为了确保测量的可靠性和一致性,在基底粗糙度测量之前首先用两条垂直的直径对样片进行区域划分,将直径为 10 mm 的圆与这两条直径相交部分作为测量点。实验中所有样片表面粗糙度的测试结果均用了这 4 区域内的 4 个点测量的平均值,并且在测量过程中避免了较明显缺陷的影响。

实验用到的所有镀膜样片是在配备了宽束冷阴极离子源的南光机械厂生产的 ZZS500-2/G 箱式光学镀膜机上制作的。为了保证不同后处理工艺对薄膜表面粗糙度研究的科学性,实验中将所有基底放在离镀膜机中心轴同一位置上,进行一次性镀制,从而确保所有基底上沉积的 TiO₂ 薄膜的厚度相等、特性相同,并让基片做高速旋转,从而降低沉积工艺对薄膜表面粗糙度的影响。镀膜时的本底真空度为 3.0×10^{-3} Pa,充氧后的工作真空度为 1.5×10^{-2} Pa,基底烘烤温度为 150 °C,TiO₂ 薄膜的沉积速率约为 0.4 nm/s,TiO₂ 薄膜镀制中的控制波长为 630 nm,薄膜的光学厚度约为 158 nm。

2.2 样片的后处理实验

将上述镀制了单层 TiO₂ 薄膜的样片按照基底粗糙度相同的原则进行分组后,分别测量每组样片的薄膜表面粗糙度,然后将每组样片按照一定的工艺进行离子束轰击处理。所有后处理实验都是在真空镀膜机上完成的。其中离子束轰击采用的是宽束冷阴极离子源,轰击的离子为氧离子。离子轰击前分别使用 5 栅网探针和朗缪尔探针对离子源发射的离子能量和束流密度进行测量^[16]。

3 实验结果及分析

基底是粗糙度为 1.95 nm 的 K9 玻璃,基底上沉积了几何厚度约为 70 nm 的 TiO₂ 薄膜。在本底真空度为 5.0×10^{-3} Pa,充氧后的工作真空度为 2.0×10^{-2} Pa,样片距离子源 25 cm 的条件下,通过调节放电电压来确保轰击样片的离子束流密度稳定在 $40 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。分别采用离子能量为 400,600,800,1000 和 1200 eV 氧离子对 TiO₂ 薄膜样片轰击 10 min 后,样片的表面粗糙度以及轰击前的 TiO₂ 薄膜样片的表面粗糙度如图 1 所示。从图 1 可以看出,沉积在基底粗糙度为 1.95 nm 的 K9 玻璃基底上的单层 TiO₂ 薄膜可以使基底的表面粗糙度降低约

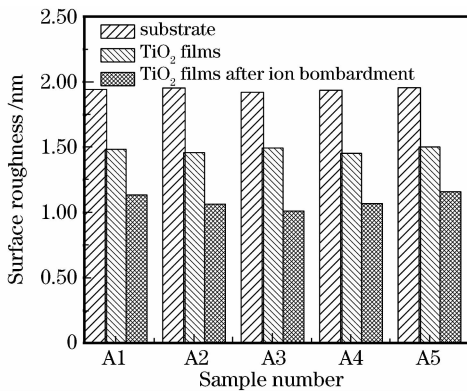


图1 基底及 TiO₂ 薄膜离子轰击前后的表面粗糙度

Fig. 1 Surface roughness of substrates and TiO₂ thin films before and after ion bombardment

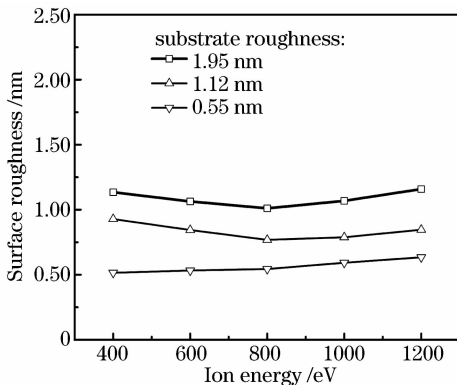


图2 TiO₂ 薄膜表面粗糙度和轰击离子能量之间的关系

Fig. 2 Surface roughness of TiO₂ thin films as a function of ion beam energy

0.5 nm,这说明 TiO₂ 薄膜对基底具有一定的平滑作用。此外,通过离子束轰击可以进一步降低该基底上沉积的 TiO₂ 薄膜的表面粗糙度,而且随着轰击的离子能量从 A1 样片的 400 eV 到 A3 样片的 800 eV,样片的表面粗糙度随着能量的增加而减小;当离子能量大于 800 eV 后,随着轰击离子能量的增加样片的表面粗糙度开始逐渐增加。图 2 给出了基底粗糙度分别为 1.95 和 1.12 nm 的 K9 玻璃基底上以及基底粗糙度为 0.55 nm 的单晶硅基底上沉积的单层 TiO₂ 薄膜在不同离子能量轰击后薄膜表面粗糙度的变化情况。其中沉积单层 TiO₂ 薄膜后,3 种不同粗糙度基底所对应的 TiO₂ 薄膜的表面粗糙度分别为 1.49,0.93 和 0.50 nm。从图 2 可以看出,对于基底粗糙度分别为 1.95 和 1.12 nm 的 K9 玻璃上沉积的 TiO₂ 薄膜样片,不同能量的离子的轰击都可以有效地改善 TiO₂ 薄膜的表面微缺陷结构使膜层更加致密,薄膜表面更加光滑。值得注意的是,当离子能量增大到一定值后,由于薄膜表面的二次溅射也会使薄膜的表面粗糙度有所增加。对于基

底粗糙度为 0.55 nm 的单晶硅基底上沉积的 TiO₂ 薄膜,其表面粗糙度约为 0.50 nm。说明 TiO₂ 薄膜对该粗糙度基底的平滑作用不是很明显,这也进一步说明了 TiO₂ 薄膜的表面粗糙度不仅与基底粗糙度有关,也与沉积中生成的固有粗糙度有关。从图 2 还可以看出,基底粗糙度为 0.55 nm 的基底上沉积的 TiO₂ 薄膜在不同离子能量轰击下,薄膜的表面粗糙度不仅没有降低,反而会随着轰击离子能量的增加而略有增加。

对基底粗糙度分别为 1.95 和 1.12 nm 的 K9 玻璃基底以及粗糙度为 0.55 nm 的单晶硅基底,沉积单层 TiO₂ 薄膜后的表面粗糙度分别为 1.49,0.93 和 0.50 nm 的 3 组样片,每组为 5 个样片,在采用与上述真空度、充氧量、轰击距离以及离子束流密度相同的条件下采用离子能量为 800 eV 的氧离子对这 3 组 TiO₂ 薄膜样片进行离子轰击,分别轰击 10,20,30,40 和 50 min 后,TiO₂ 薄膜的表面粗糙度变化情况如图 3 所示。

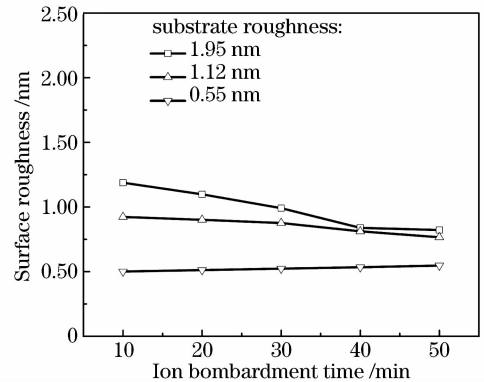


图3 TiO₂ 薄膜表面粗糙度和离子束轰击时间的关系

Fig. 3 Surface roughness of TiO₂ thin films as a function of ion beam bombardment time

从图 3 可以看出,随着氧离子轰击时间的增加,粗糙度分别为 1.95 和 1.12 nm 的 K9 玻璃基底上沉积的 TiO₂ 薄膜的表面粗糙度在不断减小,当离子轰击的时间大于 40 min 后,TiO₂ 薄膜表面粗糙度的变化减小,其表面粗糙度基本趋于平稳。这说明,离子束轰击有助于夯实膜层,使膜层更加致密,降低薄膜表面的显微缺陷;其次,利用薄膜沉积的弹道模型^[12]可知,离子束的轰击过程可以使薄膜表面凸起部分首先受到离子的轰击作用,使薄膜表面粗糙的峰值减小,随着离子轰击时间的增加,离子的轰击开始作用于薄膜表面凸起部分的侧面和凹陷部分,从而使薄膜表面粗糙度的变化减小。而对于沉积在基底粗糙度为 0.55 nm 的单晶硅基底上的 TiO₂ 薄膜,

随着离子轰击时间的增加,其表面粗糙度不仅没有减小,反而略有增加。分析其原因主要是由高能离子轰击到超光滑表面上发生了二次溅射,使薄膜表面出现了新的缺陷的缘故。

图 4 为对另外 3 组样片,在真空度、充氧量不变,轰击时间为 10 min,轰击离子能量为 800 eV 的条件下,TiO₂ 薄膜表面粗糙度随离子束流密度变化的关系曲线。其中离子束流密度的变化是依靠改变离子轰击距离来实现的。通过测试发现离子束流密度 15,30,35,40 和 45 μA/cm² 所对应的离子轰击距离分别为 30,25,20,15 和 10 cm。可以看出,随着氧离子束流密度的增加,沉积在粗糙度分别为 1.95 和 1.12 nm 的 K9 玻璃基底上 TiO₂ 薄膜的表面粗糙度的降低幅度逐渐增加,特别是在氧离子的束流密度大于 30 μA/cm² 后,TiO₂ 薄膜的表面粗糙度有较大幅度的降低,且粗糙度为 1.95 nm 基底上沉积的 TiO₂ 薄膜的表面粗糙度的降低幅度略大于粗糙度为 1.12 nm 基底上沉积的 TiO₂ 薄膜表面粗糙度。但当氧离子的束流密度小于 30 μA/cm² 时,离子轰击对 TiO₂ 薄膜表面粗糙度的影响非常小,几乎接近离子轰击前 TiO₂ 薄膜的表面粗糙度。这主要是因为,随着轰击到样片上氧离子束流密度的降低,单位时间内作用于 TiO₂ 薄膜表面的离子数目也降低,从而大大降低了轰击离子对 TiO₂ 薄膜表面的作用。图中明显不同的是,沉积在粗糙度为 0.55 nm

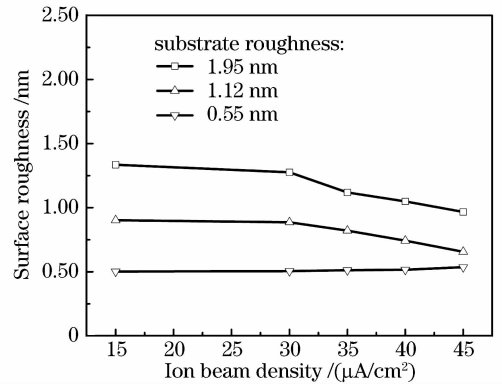


图 4 TiO₂ 薄膜表面粗糙度和离子束流密度的关系
Fig. 4 Surface roughness of TiO₂ thin films as a function of ion beam density

单晶硅基底上的 TiO₂ 薄膜,其离子处理前的表面粗糙度约为 0.50 nm,在采用不同离子束流密度的离子进行处理后,其表面粗糙度略有增加。分析其原因,主要是由于高能离子的二次溅射使薄膜表面出现新的缺陷,薄膜表面原本平整的区域再次成核并长大,从而导致薄膜表面粗糙度的增加。

图 5 为用美国 J. A. Woollam 公司制造生产的 M2000UI 型宽光谱变角度椭偏仪,在不考虑薄膜和基底之间的过渡层以及薄膜表面粗糙度的情况下,对粗糙度为 1.95 nm 的 K9 玻璃基底上沉积的 TiO₂ 薄膜在 3 种不同离子后处理的样片进行的 TiO₂ 薄膜折射率的拟合曲线。

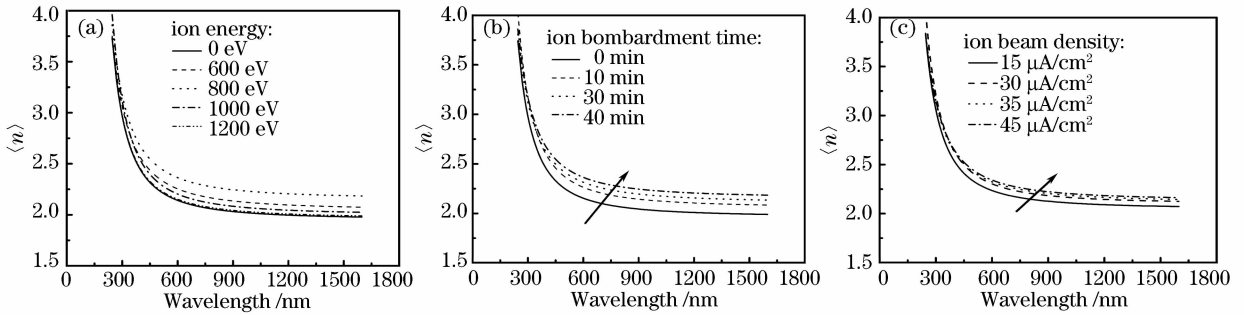


图 5 在不同离子能量(a),不同离子轰击时间(b)和不同离子束流密度(c)轰击时 TiO₂ 薄膜的折射率谱
Fig. 5 Refractive index spectra of TiO₂ thin films bombarded at different ion energies (a), ion bombardment time (b) and ion beam density (c)

从图 5(a)可以看出,没有进行离子轰击的 TiO₂ 薄膜,即表面均方根粗糙度约为 1.49 nm 的 TiO₂ 薄膜的折射率最低,在相同的结构模型和色散模型下拟合的经过不同能量离子轰击后的 TiO₂ 薄膜的折射率均大于没有经过离子轰击的 TiO₂ 薄膜的折射率。其中使用 800 eV 的氧离子轰击过的薄膜的折射率最大。这就充分验证了离子轰击可以进一步夯实膜层,使 TiO₂ 薄膜更加致密,表面更加光滑。图

5(b)和图 5(c)中 TiO₂ 薄膜的折射率谱也明显表明,随着离子轰击时间和轰击离子束流密度的增加,TiO₂ 薄膜的折射率都会有不同程度的增加。这分别与图 3,4 中,粗糙度为 1.95 nm 的 K9 玻璃基底上沉积的 TiO₂ 薄膜的表面粗糙度随离子轰击时间和轰击离子束流密度增加时,TiO₂ 薄膜表面粗糙度的变化相反。这也进一步证明了离子的后处理工艺的确可以增加膜层的致密性,使膜层的折射率增加,使

沉积在较大粗糙度基底上的 TiO_2 薄膜的表面更加光滑和平整。图 6 给出了由美国 Veeco 公司的 DI Nanoscope IV 原子力显微镜测得的粗糙度为 1.95 nm 基底上沉积的 TiO_2 薄膜样片分别在不用离子束轰击和采用 800 eV 的氧离子轰击 10 min 后的三维(3D)表面形貌。从图中可以清楚地看出,经过离子束轰击后的 TiO_2 薄膜表面的凸起明显降低,凸起之间的沟谷的宽度也明显增宽,膜层表面的缺陷明显减少,表面更加平整光滑。

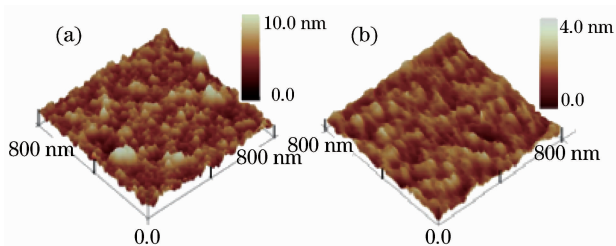


图 6 TiO_2 薄膜表面 AFM 三维形貌

(a) 轰击前;(b) 轰击后

Fig. 6 Atomic force microscope (AFM) three-dimensional (3D) images of TiO_2 thin films before (a) and after (b) ion beam bombardment

4 结 论

通过对两种不同粗糙度 K9 玻璃基底以及超光滑的单晶硅基底表面粗糙度以及沉积了单层 TiO_2 薄膜后的表面粗糙度的研究发现,电子束热蒸发技术沉积的 TiO_2 薄膜对基底具有一定的平滑作用,而且,基底的粗糙度越大, TiO_2 薄膜的表面平滑作用越明显,该结果与文献[13]所给结果一致。其次,通过对不同粗糙度基底上 TiO_2 薄膜样片的 3 种不同离子束后处理的研究发现,当基底粗糙度大于 1.12 nm 时,离子束后处理对 TiO_2 薄膜表面具有一定的平滑作用,对膜层具有一定的夯实作用,通过离子束后处理可使 TiO_2 薄膜更加致密,折射率略有增加。粗糙度为 1.95 nm 基底上沉积的 TiO_2 薄膜经过离子束后处理后, TiO_2 薄膜表面粗糙度的最大减小幅度为 0.6 nm;沉积在粗糙度为 1.12 nm 基底上的 TiO_2 薄膜的表面粗糙度最大降低幅度约为 0.36 nm。而沉积在超光滑的单晶硅基底上的 TiO_2 薄膜经离子束处理之后, TiO_2 薄膜的表面粗糙度反而有微小的增加,但仍小于基底的粗糙度。

参 考 文 献

1 C. Amra, C. Grezes-Besset, L. Bruel. Comparison of surface and bulk scattering in optical multilayers [J]. *Appl. Opt.*,

1993, **32**(28):5492~5503
 2 Wang Yinglong, Zhang Rongmei, Fu Guangsheng *et al.*. Influence of inert gas pressure on the surface roughness of silicon film prepared by pulsed laser deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):698~700
 王英龙,张荣梅,傅广生等. 环境气压对脉冲激光烧蚀沉积纳米 Si 薄膜表面粗糙度的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):698~700
 3 Hou Haihong, Fan Zhengxiu, Shao Jianda *et al.*. Scalar scattering theory of optical surfaces [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]. *激光与电子学进展*, 2005, **42**(11):35~38
 4 Hou Haihong, Sun Xilian, Shen Yanming *et al.*. Roughness and light scattering properties of ZrO_2 thin films deposited by electron beam evaporation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(6):3124~3127
 侯海虹,孙喜莲,申雁鸣等. 电子束蒸发氧化锆薄膜的粗糙度和光散射特性[J]. *物理学报*, 2006, **55**(6):3124~3127
 5 Qiu Dongjiang, Shi Chengru, Wu Huizhen. Highly transparent nanocrystalline diamond films on quartz substrates [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(8):1870~1874
 邱东江,石成儒,吴惠楨. 石英衬底上生长的高光学质量的纳米金刚石薄膜[J]. *物理学报*, 2002, **51**(8):1870~1874
 6 Pan Yongqiang, Wu Zhensen, Hang Lingxia *et al.*. Study on the interface roughness of multilayer dielectric optical thin film [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3):433~436
 潘永强,吴振森,杭凌侠等. 多层介质薄膜膜层间界面粗糙度及光散射的研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(3):433~436
 7 Wang Yingjian, Li Qingguo, Fan Zhengxiu. Property comparison of optical thin films prepared by E-beam, ion assisted deposition and ion beam sputtering [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(9):841~844
 王英剑,李庆国,范正修. 电子束、离子辅助和离子束溅射三种工艺对光学薄膜性能的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(9):841~844
 8 Tian Guanglei, Shen Yanming, Shen Jian *et al.*. Influence of technological conditions of deposition process on microstructure of thin films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):673~678
 田光磊,申雁鸣,沈健等. 制备工艺条件对薄膜微结构的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):673~678
 9 Guo Peitao, Xue Yiyu, Zhang Guangyong *et al.*. Surface morphology and optical property of Ta_2O_5 thin film [J]. *Vacuum*, 2007, **44**(5):32~35
 郭培涛,薛亦渝,张光勇等. 氧化钽薄膜表面形貌和光学性能的研究[J]. *真空*, 2007, **44**(5):32~35
 10 Hou Haihong, Hong Ruijin, Fan Zhengxiu *et al.*. Measurement of surface and volume scattering of glass substrates with high finish [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4):609~611
 侯海虹,洪瑞金,范正修等. 高光洁度玻璃基片的表面散射和体散射测量[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(4):609~611
 11 K. Meinel, K. M. Schindler, H. Neddermeyer. Scanning tunneling microscopy study on the preparation and characterization of zirconium oxide islands on Ag(100) [J]. *Surface Science*, 2002, **515**(1):226~234
 12 M. C. Salvadori, D. R. Martins, M. Cattani. DLC coating roughness as a function of film thickness [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, **200**:5119~5122
 13 Pan Yongqiang, Wu Zhensen, Hang Lingxia *et al.*. Study on surface roughness of ZrO_2 thin films [J]. *J. Applied Optics*, 2008, **29**(4):606~609
 潘永强,吴振森,杭凌侠等. 二氧化锆薄膜表面粗糙度的研究[J]. *应用光学*, 2008, **29**(4):606~609
 14 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
- 15 Wang Congjuan, Jin Yunxia, Shao Jianda *et al.*. Influence of three post-treatment methods on properties of ZrO₂ thin films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10):1600~1604
王聪娟, 晋云霞, 邵建达 等. 三种不同后处理方式对 ZrO₂ 薄膜性能的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10):1600~1604
- 16 Pan Yongqiang, Zhu Chang, Chen Zhili *et al.*. Study of properties of new end hall ion source and its ion beam characteristics [J]. *Vacuum Science and Technology*, 2003, **23**(1):57~60
潘永强, 朱 昌, 陈智利 等. 端部霍尔离子源工作特性及等离子体特性研究[J]. *真空科学与技术*, 2003, **23**(1):57~60