

文章编号: 0258-7025(2004)04-0477-05

# 非理想参数下 193 nm 光学薄膜的设计

袁景梅, 易 葵, 齐红基, 范正修, 邵建达

(中国科学院上海光学精密机械研究所光学薄膜技术与研究发展中心, 上海 201800)

**摘要** 193 nm 光学薄膜是 100 nm 步进扫描光刻机系统中主要用到的光学薄膜。分析了膜料光学常数的不确定性、高折射率膜材料消光系数、水吸收以及膜层表面粗糙度对薄膜光学性能的影响。结果表明,要镀制出反射率大于 98.5% 的高反膜,必须将高折射率材料的消光系数  $k$  控制在 0.0034 以内,同时膜层表面的粗糙度  $\sigma$  控制在 1 nm 以内。膜层性能同时还受其使用环境中水气含量及其水气中杂质含量的影响,要减少膜层水吸收的影响,就必须提高薄膜的致密度,采用离子成膜技术,或者改变膜层的使用环境。在考虑相关因素的前提下,设计了在光刻机曝光系统中主要用到的增透膜、高反膜,并分析了其实际性能与设计结果存在差别的原因。

**关键词** 薄膜技术; 193 nm 光学薄膜; 光刻机; 消光系数; 水吸收; 表面粗糙度

中图分类号 O 484 文献标识码 A

## Design of 193 nm Optical Thin Films under Practical Structure and Optical Parameters

YUAN Jing-mei, YI Kui, QI Hong-ji, FAN Zheng-xiu, SHAO Jian-da

(R&D Center for Optical Thin Film Coatings, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** 193 nm optical thin films are one of the key components in the 100 nm step and scan microlithography systems. The paper analyzed the influence of the optical constants of substrates and thin films, the extinction coefficient of high refractive materials and the surface roughness on the reflectance of HR mirrors. It showed that to obtain a mirror with reflectance of more than 98.5%, the extinction coefficient of the high-refractive material must be below 0.0034 and at the same time, with a surface roughness  $\sigma \leq 1$  nm. The influence of the water absorption on the optical performance of the coatings was also analyzed and the possible reasons resulted in the difference between the practical and theoretical performance were discussed.

**Key words** thin film technique; 193 nm optical thin film; microlithography; extinction coefficient; absorption of water; surface roughness

## 1 引 言

193 nm 光学薄膜广泛应用于微电子、医学等领域<sup>[1,2]</sup>。使用 193 nm 波长的 100 nm 步进扫描光刻机已成为下一代光刻机的主要发展方向,其中 193 nm 紫外薄膜是支持其光路系统的关键元件。

按照文献报道<sup>[3]</sup>,193 nm 光刻机的曝光系统中需要总数为 40 个左右的光学元件,也就是说有 80 个左右的光学表面需要镀膜。如果每个镜面的透过

率为 98%,则整个曝光系统的光能总利用率仅为 19.86%,如果每个薄膜元件的透过率增加 0.1%,光能总利用率便会增加到 45%左右,也就意味着生产效率可以提高到原来的两倍多。可见系统中薄膜元件的光学性能直接影响到整个系统的通光效率。而通光效率的高低又直接影响到光刻机光刻的效率,即产品的生产效率。在 193 nm 波段,由于材料的吸收、散射及其他因素的影响,要想镀制出满足光

收稿日期:2002-10-11; 收到修改稿日期:2002-12-04

作者简介:袁景梅(1978—),女,山西晋城人,中国科学院上海光学精密机械研究所研究实习员,硕士,主要从事高性能紫外光学薄膜的研制工作。E-mail:jmyuan@siom.ac.cn

刻机系统光学性能需要的薄膜元件是相当困难的。目前国内在这个波段的反射率可达 95%，而国际上能做到 98% 左右<sup>[4,5]</sup>。

## 2 影响薄膜光学性能的主要因素

### 2.1 光学薄膜材料及基底在 193 nm 的光学常数

由于材料的色散,其光学常数在 193 nm 处明显地区别于可见及红外波段,多数高折射率材料在此波段已存在较大的消光系数。同时,膜层的光学

常数还严重依赖于沉积设备和沉积条件,所以在设计膜系前对所要使用的材料进行详尽的研究并找出膜料在最佳沉积工艺下的光学常数是十分必要的。在 193 nm 这个波段透光的基底主要有紫外级熔石英,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ , 蓝宝石;用于制膜的高折射率材料主要有  $\text{LaF}_3$ ,  $\text{NdF}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ;低折射率材料主要有  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ <sup>[6]</sup>。在一定的蒸发条件下(氧化物用电子束热蒸发,氟化物用电阻热蒸发),一些材料在 193 nm 波段的折射率及消光系数如表 1 所示。

表 1 几种薄膜材料在 193 nm 波段的光学常数

Table 1 Optical coefficient of several thin-film materials at 193 nm

Material	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Y}_2\text{O}_3$	$\text{LaF}_3$	$\text{NdF}_3$	$\text{MgF}_2$	$\text{Na}_3\text{AlF}_6$	$\text{SiO}_2$	$\text{HfO}_2$
Refractive index	1.855	2.314	1.895	1.679	1.621	1.675	1.59	Abnormal
Extinction coefficient	0.0002	0.0035	0.0029	0.0085	0.01	0	0	0.016

采用文献[6]介绍的方法得出了  $\text{JGS}_1$  紫外级熔石英块状材料及其利用电子束蒸发成膜后折射率色散曲线如图 1 所示,可见块状材料成膜后折射率会降低,进行膜系设计前应对所使用的材料予以充分分析。

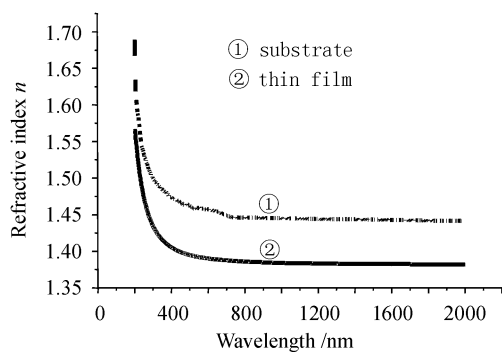


图 1  $\text{JGS}_1$  块状材料及其在电子束蒸发条件下成膜后的折射率色散曲线

Fig. 1 Refractive index of solid UV- $\text{SiO}_2$  and e-beam evaporated one

### 2.2 高折射率材料消光系数

在有些工作中<sup>[7]</sup>考虑了膜材料折射率的色散对膜层光学性能的影响,而消光系数的大小对高反射率的影响没有进行深入的讨论。理论上,对于  $\lambda/4$  的规整膜系,多层膜的反射率会随着薄膜层数的增加而无限地接近 100%,而实际上由于膜材料本身的吸收、散射等影响,多层膜的实测反射率将比理想状态的理论值要小。图 2 所示为假设高折射率材料消光系数为 0.6,折射率为 2.0,低折射率材

料消光系数为 0,折射率为 1.46 时,分别在  $0^\circ$  和  $45^\circ$  入射条件下,  $\lambda/4$  规整膜堆  $(\text{HL})^n\text{H}$  的反射率随 (HL) 周期数  $n$  变化的规律(本文所有的反射率均由 Tffcalc 膜系设计软件计算得出)。

由图 2 可见,当考虑高折射率材料存在的消光系数时,  $\lambda/4$  规整膜堆要达到最大反射率存在一个最佳 (HL) 周期数,并非周期数越多反射率越高。

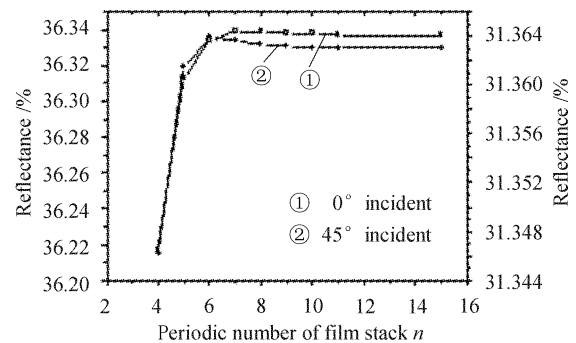


图 2  $\lambda/4$  规整膜堆  $(\text{HL})^n\text{H}$  的反射率随 (HL) 周期数而变化的规律 ( $k_H = 0.6$ )

Fig. 2 Relationship between the reflectance and periodic numbers of film stack with  $k_H = 0.6$  of the high refractive material

下面,我们分别计算了在  $0^\circ$  和  $45^\circ$  入射的条件下,高折射率材料存在不同的消光系数时,  $\lambda/4$  规整膜堆所能达到的最大反射率以及相应需要的膜层数,如图 3(a),(b)所示。其中高折射率材料折射率  $n_H = 2$ ,低折射率材料折射率  $n_L = 1.46$  (如果反射率已达到 99.9%,则不再增加膜层数)。

由图 3 结果可知,如果低折射率材料的消光系数为 0,而  $\lambda/4$  规整膜堆要达到一定的反射率,所需的高折射率材料的消光系数必须小于表 2 的数据。

在计算过程中发现,相应膜层数的起伏与反射率值的精度要求有关。

表 2  $n_H=2, n_L=1.46$  的  $\lambda/4$  规整膜堆要达到一定反射率时高折射率材料能存在的最大消光系数

Table 2 Maximal value of a regular  $\lambda/4$  thin film stack when  $n_H=2, n_L=1.46$

Incident angle	Maximal value of $k$ with $R=99.9\%$	Maximal value of $k$ with $R=99\%$	Maximal value of $k$ with $R=98\%$
$0^\circ$	0.00034	0.0034	0.0069
$45^\circ$	0.00025	0.0024	0.0048

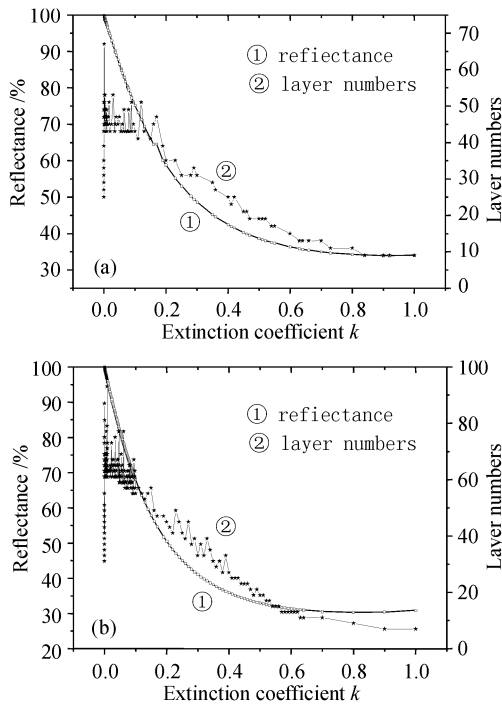


图 3 高折射率材料存在不同消光系数时,  $\lambda/4$  规整膜堆反射率所能达到的最大值以及相应所需要的膜层数 (a)  $0^\circ$ 入射; (b)  $45^\circ$ 入射

Fig. 3 Relationship between the highest reflectance of a regular  $\lambda/4$  thin film stack and the periodic numbers at the different extinction coefficients of the high index material with the incident angle (a)  $0^\circ$ ; (b)  $45^\circ$

如果在膜系设计中没有考虑材料的消光系数,则实际制膜的结果与设计结果会出现很大的差别。图 4 表示不考虑高折射率膜层的消光系数时所设计

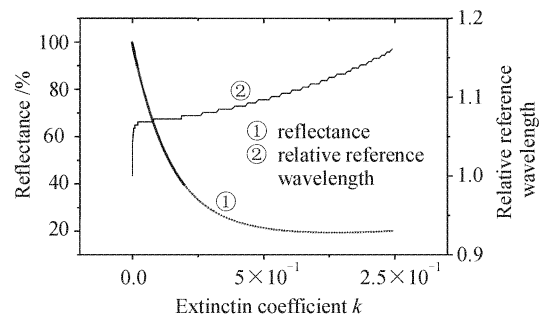


图 4 消光系数对高反膜反射率的影响

Fig. 4 Effects of the extinction coefficient on the reflectance of a ideal HR mirror designed under neglect of the extinction coefficient

的  $0^\circ$ 入射反射率达到 99.9%的  $\lambda/4$  规整膜系,在高折射率材料具有不同的  $k$  值时,能实际达到的最大反射率值。这里为了让反射率的最高点落在要求的波段,改变了相应的参考波长。

由图 4 可知,当所用的高折射率材料的消光系数大于 0.0014 时,膜层反射率就达不到 99%,而当其  $k$  值大于 0.0033 时,镀制出的膜层反射率就不能达到 98%。在 193 nm 波长,很少有高折射率材料的消光系数小于 0.003,也就是说要想镀制出反射率大于 98%的 193 nm 高反膜必须慎选成膜材料。

### 2.3 水吸收

用热蒸发手段沉积的薄膜,由于柱状生长导致薄膜结构疏松,存在很多空隙。对于非封闭型的空隙,很容易被空气中的水蒸气填充,从而影响到膜层的光学和物理性能。为了解水吸附对膜层性能的影响,分别对纯净水和自来水的特性进行了研究。图 5 所示为由 DE 公司生产的 Lambda900(测量精度  $\pm 0.08\%$ )测得的 10 mm  $\times$  10 mm 空石英容器及容

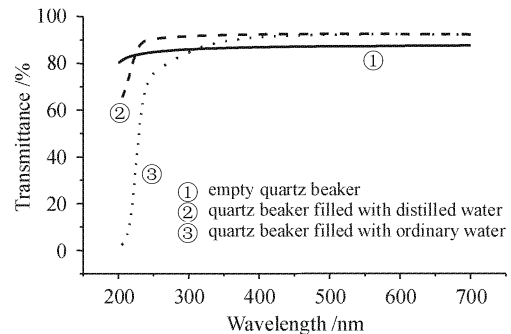


图 5 空的和分别装有 10 mm 的纯净水和自来水的石英容器的透射率曲线

Fig. 5 Transmittance spectrum of an empty quartz beaker, beaker filled with 10 mm distilled water and ordinary water respectively

器分别装上纯净水和自来水后的透射率曲线比较。

由图 5 可以看出,与纯净水相比,自来水在紫外区存在明显的吸收。空气质量会影响空气中水气的纯度,从而对膜层性能产生不同程度的影响。由  $n = \frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}}$  和  $\alpha = \frac{A}{l}$ , 其中  $l$  为光在水中传播的距离,  $A$  为水的吸收率,得到两种水折射率与吸收系数随波长的变化曲线分别如图 6(a),(b)所示。

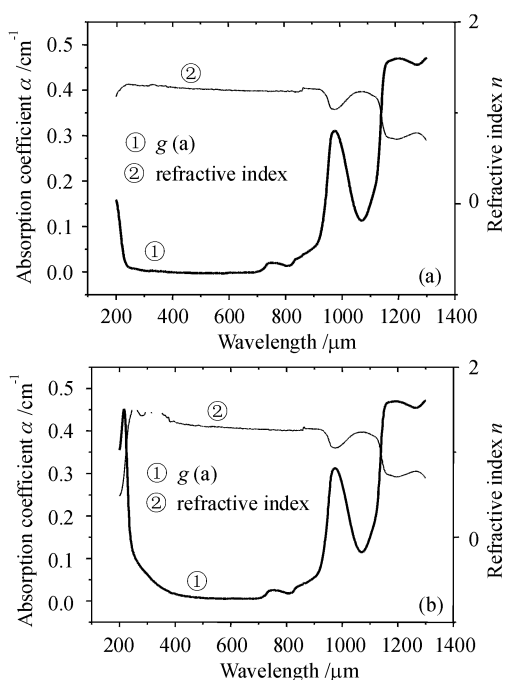


图 6 水的折射率和吸收系数  
(a) 纯净水;(b) 自来水

Fig. 6 Absorption coefficient and refractive index of distilled water (a) and ordinary water (b)

比较图 6(a),(b)可见,自来水对波长小于 361 nm 的光就存在明显的吸收,使得其折射率在这个区域出现反常色散,变化不再符合柯西规律。而纯净水对波长小于 232 nm 的光才存在明显的吸收。纯净水和自来水在 972 nm 和 1190 nm 附近都出现了吸收峰,这是由水的本征吸收引起的。不同的沉积手段镀制的膜层堆积密度不同,受水吸收影响的程度也就不同。可以通过使用离子束辅助的沉积方法来提高膜料的堆积密度,对膜层进行充干燥氮气的方法进行保护以减少在存储、运输过程中膜层与水气的接触,以此来减少膜层受水吸收的影响。

## 2.4 膜层表面粗糙度

膜层表面的非平整性会使光能量发生散射,从而降低膜层反射率。在正入射条件下,单个粗糙界

面的反射率为<sup>[8]</sup> $R_s = R_0 \exp\left[-\left(\frac{4\pi}{\lambda} \sigma n_0\right)^2\right]$ , 其中  $R_0$  为理想界面的反射率,  $\sigma$  为均方根表面粗糙度,  $n_0 = 1$  为入射介质即空气的折射率。图 7 给出了  $\lambda = 193$  nm,  $R_0 = 99.9\%$  时  $R_s$  随  $\sigma$  变化的规律。

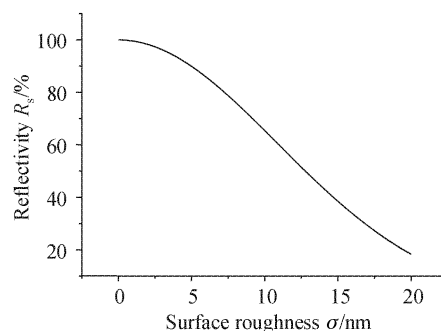


图 7 膜层表面粗糙度对 193 nm 高反膜反射率的影响  
Fig. 7 Effect of surface roughness on reflectance of the 193 nm mirror

可见在 193 nm 波段,当膜层表面的均方根粗糙度  $\sigma > 1.46$  nm 时,对于理想表面能达到 99.9% 的膜系,实际反射率便达不到 99%,而当  $\sigma > 2.12$  nm 时,反射率便无法达到 98%。为了使薄膜的散射损耗足够小且杂光干扰足够低,薄膜的粗糙度必须足够低。

## 3 193 nm 光学薄膜的膜系设计

上述分析表明在 193 nm 波段影响膜层光学性能的主要因素是材料的本征吸收、水吸收及散射。故在进行膜系设计时必须充分考虑基底及膜料折射率和消光系数的色散情况、水吸收和膜层表面粗糙度对膜层光学性能的影响,以求得更符合实际镀制结果的设计结论。由于很多材料在 193 nm 波段的消光系数很大,极大地影响到  $\lambda/4$  规整膜堆组成的高反膜的反射率。这里以消光系数相对较小的 H:  $Y_2O_3$  ( $n = 2.314, k = 0.0035$ ) 和 L:  $SiO_2$  ( $n = 1.59$ ) 作为高低折射率材料配对,将 H(LH)-20 镀制在紫外级熔石英基底上,设膜层表面粗糙度  $\sigma = 1$  nm,其他因素使膜层反射率降低 0.5%,设计出如图 8(a)所示的  $0^\circ$  入射下膜系优化前后膜层的反射率曲线,优化前膜层的反射率为 97.8%,优化后达到 98.5%。经优化后膜层的反射率有所提高,但制膜的难度也大大增加了。

其他条件不变,  $45^\circ$  入射时,反射膜的反射带更窄,反射率比  $0^\circ$  入射时低,图 8(b)示出了这种变化,

给出了 45° 入射下膜系优化前后膜层的反射率曲线。

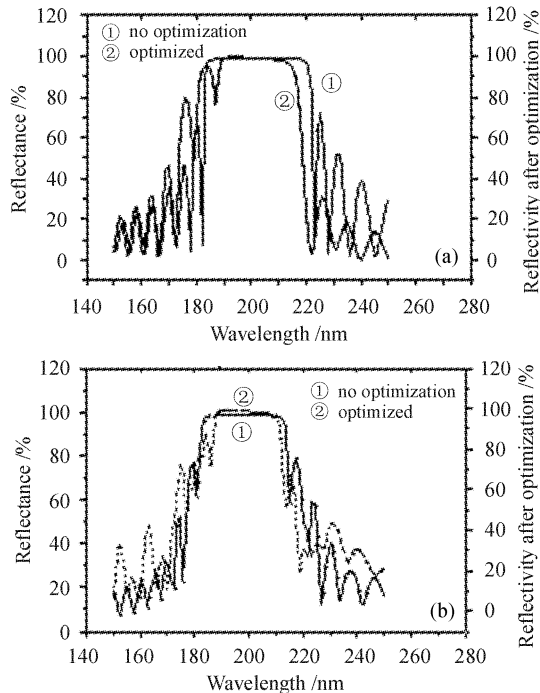


图 8 优化前后  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  H(LH) $\cdot$ 20 膜层的反射率曲线

(a) 0° 入射; (b) 45° 入射

Fig. 8 Reflectance spectrum of  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  H(LH) $\cdot$ 20 designed with and without variable matrix optimization at a 0° incident angle (a) and 45° incident angle (b)

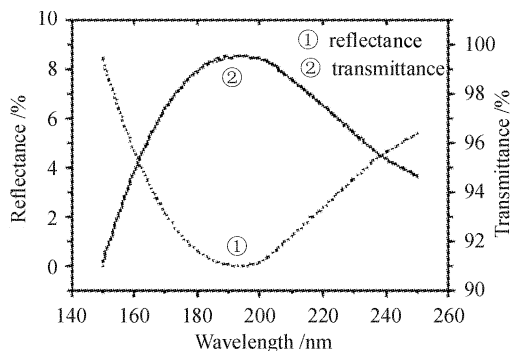


图 9 193 nm 增透膜膜层的透射率和反射率

Fig. 9 Reflectance and transmittance spectrum of an 193 nm AR thin film

在紫外级熔石英基底上镀 0.6H1.4L 的减反膜,可以使垂直入射下其单面反射率从 6.57% 下降到小于 0.01%,而透射率由 93.4% 增加到 99.5%,如图 9 所示。

膜系设计中充分考虑了各种因素对膜层光学性能的影响,然而实际镀制的结果和设计结果总是会

存在一定的差别,其原因主要有:1) 膜层的厚度存在控制误差;2) 真空度、基板温度等镀制条件的变化会对膜层的光学性能产生影响。所以在实际制膜过程中必须努力提高膜厚控制的精度以及稳定各种沉积条件,以得到理想的结果。

## 4 结 论

本文就可能影响 100 nm 步进扫描光刻机中最常用的高反膜与增透膜的光学性能的因素进行了深入的分析,结果表明:1) 对于由  $n_H = 2, n_L = 1.46$  的理想膜料交替蒸发形成  $\lambda/4$  规整膜堆形成的垂直入射反射率大于 99.9% 的高反膜,只要高折射率材料的消光系数  $k > 0.0034$ ,反射率就无法达到 99%,只有在  $k < 0.007$  的条件下,反射率才能达到 98%;2) 不考虑其他影响因素,当膜层表面的粗糙度  $\sigma > 1.46$  nm 时,对于想表面能达到 99.9% 的膜系,实际反射率便达不到 99%,而当  $\sigma > 2.12$  nm 时,实际反射率便无法达到 98%;3) 膜层性能受其使用环境中水气的含量及其水气中杂质含量的影响,要想减少膜层水吸收的影响,就要提高薄膜的致密度,或者改变膜层的使用环境;4) 要想镀制出反射率大于 98.5% 的高反膜,必须将高折射率材料的消光系数  $k$  控制在 0.0034 以内,同时膜层表面的粗糙度  $\sigma$  控制在 1 nm 以内。

## 参 考 文 献

- 1 Song Dengyuan. Research status of deep ultraviolet lithography with 193 nm excimer laser [J]. *Laser Technology*, 1999, **23**(5): 288~291  
宋登元. ArF 准分子激光光刻的研究现状[J]. 激光技术, 1999, **23**(5): 288~291
- 2 Xie Changqing, Ye Tianchun. 193 nm optical lithography technique [J]. *Microelectronic Technology*, 1999, **27**(4): 9~12  
谢常青,叶甜春. 193 nm 光学光刻技术[J]. 微电子学, 1999, **27**(4): 9~12
- 3 Guy Davies, Judon Stoeldraijer, Barbra Heskamp *et al.*. 193 nm Step and Scan Lithography [C]. *SEMI Technology Symposium* 98, Makuhari Messe, Chiba, Japan. 1~15
- 4 Glen P. Callahan, Bruce K. Flint. Characteristics of deep UV optics at 193 nm & 157 nm [C]. *SPIE*, 1998, **3578**: 45~53
- 5 Philippe Torchio, Alexandre Gatto, Marco Alvisi *et al.*. High-reflectivity  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  ultraviolet mirrors [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(16): 3256~3261
- 6 Yuan Jingmei, Tang Zhaosheng, Qi Hongji *et al.*. Analysis of optical property for several ultraviolet thin-films materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 984~988  
袁景梅,汤兆胜,齐红基等. 几种紫外薄膜材料的光学常数和性能分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(8): 984~988
- 7 Huang Xiangcheng, Yang Hua, Yang Yiming. The coating results of ultraviolet optical thin film [J]. *Applied Optics*, 1998, **19**(5): 29~31  
黄祥成,杨华,杨益民等. 紫外光学薄膜的镀制结果[J]. 应用光学, 1998, **19**(5): 29~31
- 8 J. O. Porteus. Relation between the height distribution of a rough surface and the reflectance at normal incidence [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1963, **53**(12): 1394~1402