

# 低损耗 193 nm 增透膜\*

尚淑珍<sup>1)†</sup> 邵建达<sup>2)</sup> 范正修<sup>2)</sup>

1) 华东理工大学机械与动力工程学院承压系统安全科学教育部重点实验室, 上海 200237)

2) 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2007 年 11 月 11 日收到, 2007 年 12 月 4 日收到修改稿)

计算了适用于 193 nm 增透膜设计与制备的基底与薄膜材料的光学常数, 并在此基础上对 193 nm 增透膜进行了设计、制备与性能分析. 发现基底材料的吸收损耗对增透膜元件的影响很大, 超过一定值时, 增透膜元件的设计透过率将达不到理想水平. 对单面增透膜的设计与制备结果表明, 当吸收损耗降低到一定程度, 散射损耗成为不可忽略的因素. 采用热舟蒸发方法实现了性能良好的 193 nm 减反射膜, 剩余反射率在 0.2% 以下.

关键词: 193 nm, 增透膜, 光学损耗, 剩余反射率

PACC: 8115G, 7820, 8140

## 1. 引 言

随着激光在半导体工业的应用, 要求光学薄膜在短波长范围具有高性能及稳定性. 尤其是用于 ArF 激光系统的光学薄膜对于激光微加工及光刻技术具有重要意义. 193 nm 光刻机系统中需要 80 片左右的光学镜片, 若每个镜片的透过率为 98%, 则整个系统的最后输出能量为输入能量的 19.86%. 从中可以看出系统中透射性光学元器件表面所镀增透薄膜的好坏将直接影响整个光刻的质量.

193 nm 增透膜的光学性能主要由基底材料与薄膜材料的光学常数、沉积方法及工艺条件等因素决定<sup>[1-12]</sup>. 只有高纯度的熔融石英和氟化钙是比较适合的基底材料, 氟化物材料是膜料的最好选择, 因为它们的电子带隙要比氧化物的大<sup>[1-5]</sup>. MgF<sub>2</sub>-LaF<sub>3</sub> 被认为是最有潜力的一种材料组合, 它们具有比较小的折射率对比系数而且两种材料均具有大带宽使得在 VUV 波段具有低的吸收. 为克服薄膜的损耗问题, 国际上采用各种能量辅助沉积方法来沉积 193 nm 光学薄膜, 如溅射、离子镀、离子辅助和等离子体离子辅助等方法<sup>[6-9]</sup>. 尽管如此, 减少 193 nm 薄膜的光学损耗仍然是一个难题. 经典的 PVD 技术是比较好的 193 nm 镀膜技术<sup>[10-12]</sup>, 其中氧化物主要采

用电子束热蒸发, 氟化物主要采用热舟蒸发.

增透膜一般采用单面或双面镀膜, 通过降低单个表面的反射损耗以提高透射率. 本文选用高纯度的 JGS1 型熔融石英基底, MgF<sub>2</sub>-LaF<sub>3</sub> 高低折射率材料组合, 进行增透膜的设计与制备. 首先根据基底与薄膜材料的光学常数色散曲线, 对 193 nm 增透膜进行了设计与误差分析, 并根据设计结果对 193 nm 增透膜进行了制备与结果讨论.

## 2. 增透膜的设计与误差分析

### 2.1. 增透膜的设计

采用两种常用的稳定的镀膜材料相间镀制的多层减反射膜, 工艺简单, 比较实用. 经分析计算表明, 它的减反射效果良好, 因此我们采用这种膜系. 增透膜设计采用 1/4 规整膜系 LHL, 其中 H 代表  $\lambda/4$  光学厚度的高折射率材料 LaF<sub>3</sub> 膜层, L 代表  $\lambda/4$  光学厚度的低折射率材料 MgF<sub>2</sub> 膜层, 与基底相邻的第一层为低折射率膜层.

设计中采用的基底与薄膜材料的光学常数(折射率  $n$  和消光系数  $k$ )色散曲线, 是考虑基底与薄膜材料的吸收, 采用光度法计算所得. 图 1—3 分别为 JGS1 型熔融石英基底、LaF<sub>3</sub> 与 MgF<sub>2</sub> 材料的光学常

\* 上海市重点学科建设项目(批准号: B503)资助的课题.

† E-mail: shangshuzhen@ecust.edu.cn

数色散曲线.

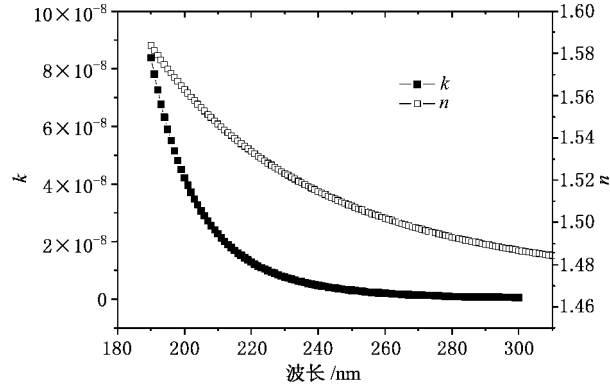


图 1 熔融石英基底材料的光学常数色散曲线

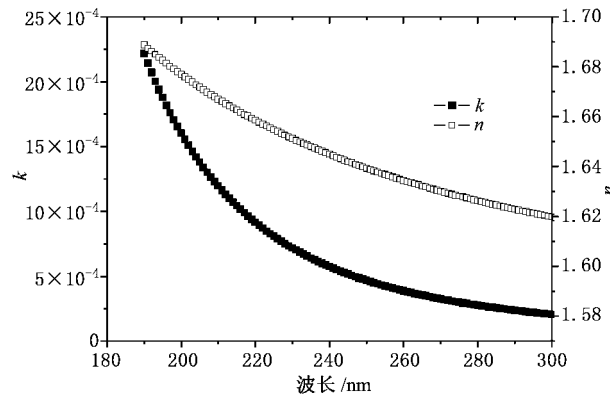


图 2 LaF<sub>3</sub> 材料的折射率 n 和消光系数 k 色散曲线

从中可以看出基底在 193 nm 波长处的消光系数在 10<sup>-8</sup> 量级,已经存在了一定的吸收.根据基底尺寸 φ30 mm×3 mm 经计算得基底的单面反射率与

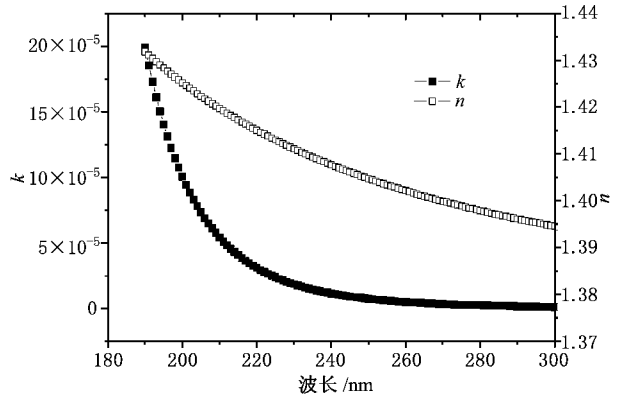
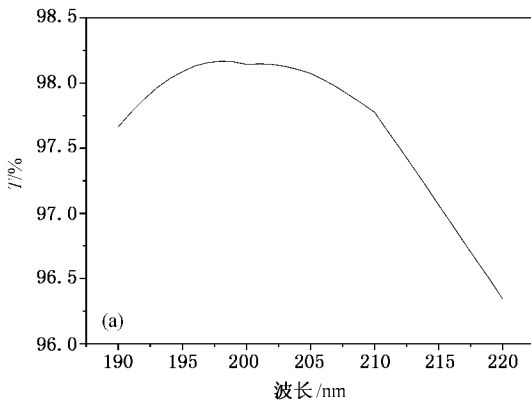


图 3 MgF<sub>2</sub> 材料的折射率 n 和消光系数 k 色散曲线

吸收损耗分别为 5.01% 与 0.90%.高折射率材料 LaF<sub>3</sub> 的消光系数在 10<sup>-3</sup> 量级,低折射率材料 MgF<sub>2</sub> 的消光系数在 10<sup>-4</sup> 量级,与一般文献报道的结果差别不大,基本在一个水平,能够应用于 193 nm 增透膜的设计与制备.

双面增透膜与单面增透膜的透射率设计曲线见图 4(a)与(b),单面剩余反射率的设计曲线见图 5,在设计波长 193 nm 处双面增透膜的透射率为 97.96%,单面增透膜的透射率为 93.59%,单面剩余反射率为 0.11%.在不考虑基底吸收损耗的基础上,双面增透膜的设计透过率将达到 98.86%,单面增透膜的光学损耗为 0.46%.说明设计中所采用的基底材料吸收偏高,严重影响了整个元件的设计透射率,因此在下面的误差分析及增透膜制备中取单面增透膜的设计结果进行.

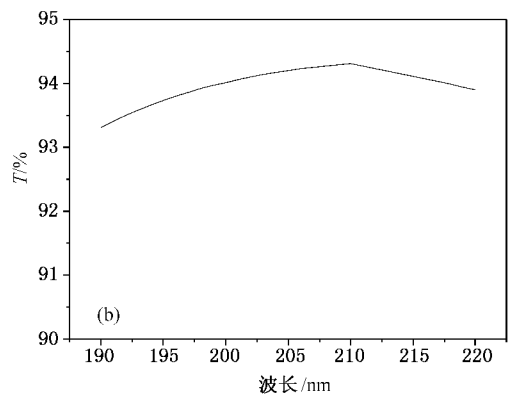


图 4 193 nm 增透膜的设计透射率曲线

2.2. 膜厚控制误差分析

增透膜的设计结果主要取决于基底与薄膜材料的光学常数及厚度,设计中用计算所得的基底的

光学常数,薄膜材料的光学常数在设计前根据具体的沉积情况进行计算,因此这里主要分析膜系结构对膜厚变化的敏感性.

图 6 所示为高低折射率膜层厚度同时增大或者

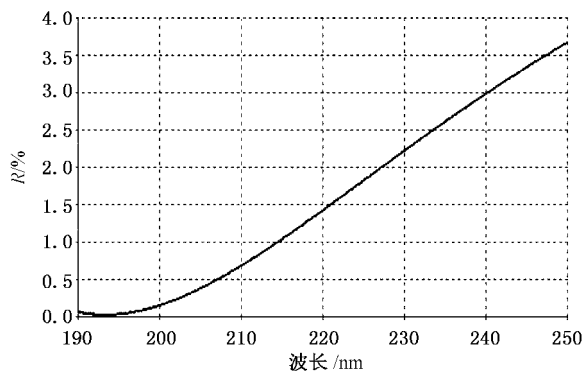


图 5 193 nm 增透膜的设计剩余反射率曲线

减小时对增透膜的剩余反射率的影响,厚度的变化范围取  $\pm 2\%$ ,  $\pm 3\%$  及  $\pm 5\%$ . 图 7 所示为高折射率膜层厚度变化量取  $\pm 2\%$ ,  $\pm 3\%$  及  $\pm 5\%$ , 低折射率膜层厚度反方向变化时,增透膜的剩余反射率的变化情况.

可见,高低折射率材料厚度同方向变化时对增透膜的剩余反射率的影响较大,当厚度的变化取  $\pm 3\%$  时,增透膜的剩余反射率将超过 0.20%. 高低折射率材料厚度反方向变化时对增透膜的剩余反射率的影响相对较小,变化量取 5% 时,反射率仍然在 0.15% 以内.

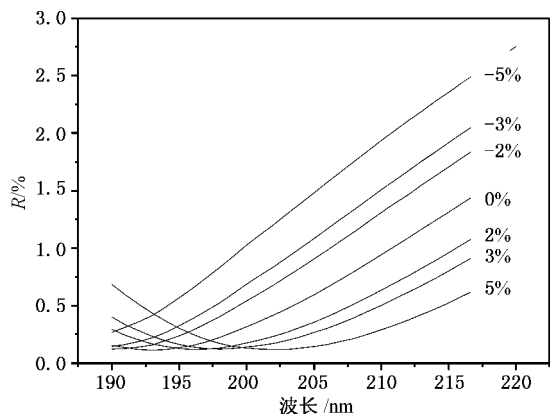


图 6 高低折射率材料厚度同方向变化时对反射率的影响

### 3. 增透膜制备与结果讨论

#### 3.1. 增透膜制备

增透膜制备工艺条件与计算光学常数时采用的单层膜制备工艺条件相同, JGS1 型熔融石英基底尺寸为  $\phi 30 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 氟化镁材料的纯度标定为 99.999%, 氟化镧材料的纯度标定为 99.9%. 增透膜中高低折射率材料  $\text{LaF}_3$  与  $\text{MgF}_2$  膜层采用热舟蒸发

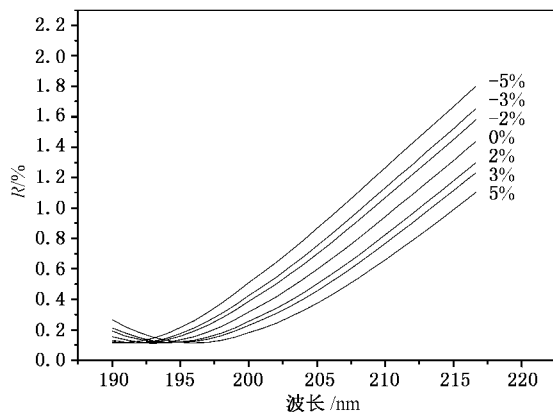


图 7 高低折射率材料厚度反方向变化时对反射率的影响

方法在高真空镀膜系统(镀膜机型号: DMDE450)中沉积. 基片首先在有机溶液中进行超声波清洗, 然后再经过仔细擦洗. 镀膜时的本底真空度为  $2.666 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ , 工作真空度为  $4.933 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ , 残余气体为空气. 沉积温度为  $300^\circ\text{C}$ , 高低折射率材料  $\text{LaF}_3$  与  $\text{MgF}_2$  的沉积速率分别为  $0.32 \text{ nm/s}$  与  $0.39 \text{ nm/s}$ . 为了提高薄膜的均匀性, 在烘烤及镀膜过程中基片进行高速度旋转.

光谱测量均由 Perkin Elmer 公司生产的 Lambda900 光谱测试仪获得, 仪器的波长分辨率为  $\pm 0.08 \text{ nm}$ . 为防止空气中的水、氧气等对测量结果的影响, 测量过程中充入高纯氮气, 氮气流量在测量过程中保持在 7—10 L/min. 剩余反射率测量采用相对反射率的测量方法进行, 测量光路示意图见图 8.

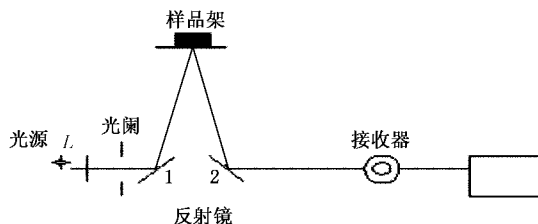


图 8 相对反射率测量原理图

#### 3.2. 结果讨论

图 9 及图 10 所示分别为制备所得的 193 nm 增透膜的透射率与剩余反射率光谱测量曲线. 在 193 nm 波长处透射率为 93.50%, 剩余反射率低于 0.16%, 实验结果与理论计算结果非常接近, 说明设计计算结果准确可靠.

为了进一步分析增透膜的性能以及基底材料对增透膜元件的影响, 采用原子力显微镜测量了样品的表面形貌, 图 11(a)(b) 分别为表面形貌的三维

图与二维图 表面均方根粗糙度  $r_{ms}$  为 0.979 nm. 总积分散射采用式  $TIS = \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2$  计算得 0.40% ,结合

2.1 中单面增透膜光学损耗的计算结果( 0.46% ) ,表明散射损耗在增透膜的光学损耗中起主导作用.

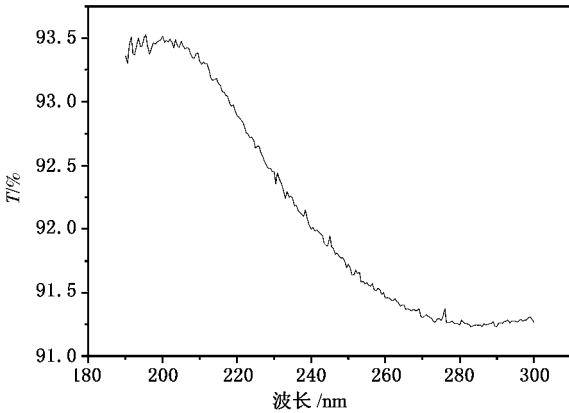


图 9 193 nm 增透膜的测量透射率曲线

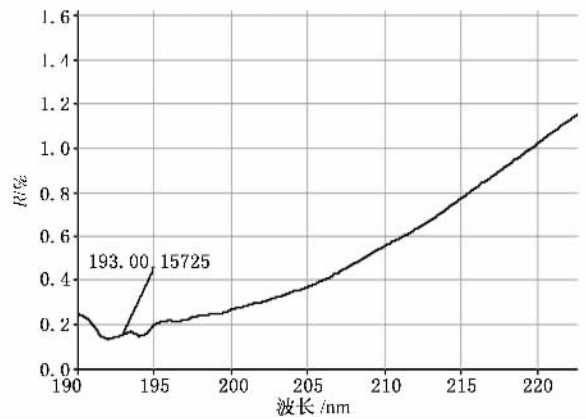


图 10 193 nm 增透膜的测量剩余反射率曲线

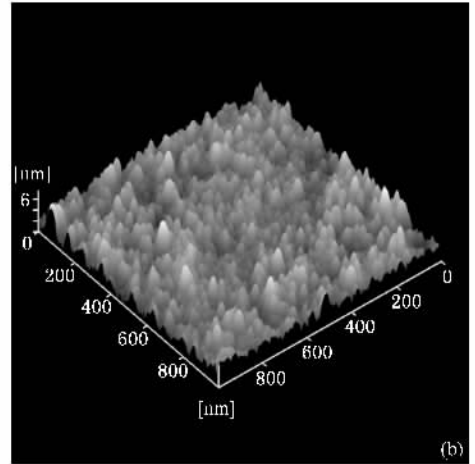
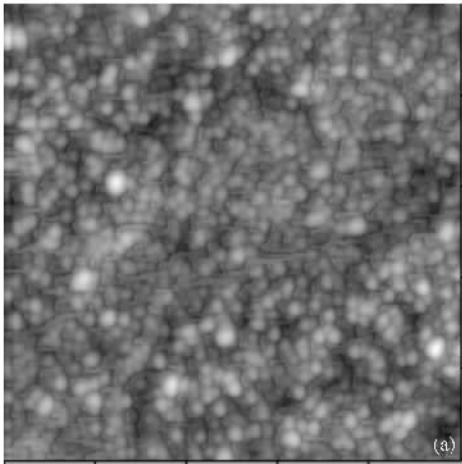


图 11 增透膜的表面形貌图

### 4. 结 论

采用传统的热蒸发方法沉积的  $LaF_3$  与  $MgF_2$  材料的单层膜吸收损耗较低,适用于 193 nm 增透膜的设计与制备. 基底材料的吸收损耗对增透膜元件

的影响很大,超过一定值时,增透膜元件的设计透过率将达不到理想水平. 对单面增透膜的设计与制备结果表明,当吸收损耗降低到一定程度,散射损耗成为不可忽略的因素,要想进一步提高增透膜的性能,必须从降低散射损耗入手.

[ 1 ] Callahan G P , Flint B K 1998 *SPIE* **3578** 45  
 [ 2 ] Liberman V , Rothschild M , Sedlacek J H C , Uttaro R S , Grenville A , Bates A K , Van Peski C 1999 *Optics Letters* **24** 58  
 [ 3 ] Ferre-Borrull J , Duparre A , Quesnel E 2000 *Appl. Opt.* **39** 5854  
 [ 4 ] Gliech S , Steinert J , Duparre A 2002 *Appl. Opt.* **41** 3224

[ 5 ] Sahoo N K , Thakur S , Senthilkumar M , Bhattacharyya D , Das N C 2003 *Thin Solid Films* **440** 155  
 [ 6 ] Becker J , Scheuer V 1990 *Applied Optics* **29** 4303  
 [ 7 ] Kennedy M , Ristau D , Niederwald H S 1998 *Thin Solid Films* **333** 191

- [ 8 ] Jacob D , Peiro F , Ristau D 2000 *Thin Solid Films* **360** 133
- [ 9 ] Taki Y , Muramatsu K 2002 *Thin Solid Films* **420-421** 30
- [ 10 ] Ristau D , Gunster S , Bosch S , Duparre A , Masetti E , Kiriakidis G , Peiro F , Quesnel E , Tikhonravov A 2002 *Applied Optics* **41** 3196
- [ 11 ] Vijayakumar M , Selvasekarapandian S , Gnanasekaran T , Fujihara S , Koji S 2004 *Journal of Fluorine Chemistry* **125** 1119
- [ 12 ] Shang S Z , Shao J D , Shen J , Yi K , Fan Z X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2639 [ 尚淑珍、邵建达、沈 健、易 葵、范正修 2006 物理学报 **55** 2639 ]

## Low-loss 193nm anti-reflection coatings <sup>\*</sup>

Shang Shu-Zhen<sup>1)†</sup> Shao Jian-Da<sup>2)</sup> Fan Zheng-Xiu<sup>2)</sup>

<sup>1</sup> *Key Laboratory of Safety Science of Pressurized System , Ministry of Education , School of Mechanical Engineering East China University of Science and Technology , Shanghai 200237 , China )*

<sup>2</sup> *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China )*

( Received 11 November 2007 ; revised manuscript received 4 December 2007 )

### Abstract

The optical constants suitable for designing and depositing 193nm AR coatings were calculated , and 193nm AR coatings were designed , produced and characterized on the basis of the calculated results . It was found that the extinction loss of the substrate material had such an important effect that when it was beyond a certain level the designed transmittance could not reach the ideal value . The designed and manufactured results of the single-surface AR coatings revealed that scattering loss began to play the key role when the absorbance loss decreased to a certain extent . High performance 193nm AR coatings with residual reflectance lower than 0.2% have been prepared by the resistant boat evaporation method .

**Keywords** : 193 nm , AR coatings , optical loss , reflection

**PACC** : 8115G , 7820 , 8140

<sup>\*</sup> Project supported by the Shanghai Leading Academ Discipline Project ( Grant No. B503 ).

<sup>†</sup> E-mail : shangshuzhen@ecust.edu.cn