

# 光刻曝光系统中新型光可变衰减器的研制

李美萱<sup>1,2</sup>, 王丽<sup>1</sup>, 董连和<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>长春理工大学光电信息学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 在超大规模集成电路中,为满足数值孔径为 1.35、波长为 193 nm 的光刻曝光系统 45 nm 的成像分辨率要求,设计了一种新型光可变衰减器,用于控制系统的光能透射率,调整曝光能量。该衰减器在光入射角为 20°~40° 时,衰减面的平均透射率呈线性变化并从 95% 降低至 8%,同时保证其余三个表面的光能损失均低于 1%。设计和制作了光可变衰减器的光学薄膜,其基底材料选择熔融石英,膜层材料采用 LaF<sub>3</sub> 和 AlF<sub>3</sub>。实验测试了光可变衰减器系统性能,测试结果显示该系统的光能透射率在 8%~90% 范围内连续可调,实验结果满足设计要求。与传统光可变衰减器相比,该系统可调制衰减范围更大,衰减量更稳定,具有一定的应用价值。

**关键词** 薄膜; 深紫外光刻; 光可变衰减器; 截止滤光膜; 光学镀膜

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0103002

## Development of a Novel Optical Variable Attenuator in Lithography Exposure System

Li Meixuan<sup>1,2</sup>, Wang Li<sup>1</sup>, Dong Lianhe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** In order to achieve the imaging resolution of 45 nm with a numerical aperture of 1.35 and a wavelength of 193 nm in the lithography exposure system of ultra-large scale integrated circuits, a novel optical variable attenuator is designed. The device cannot only control the light transmittance, but also adjust the exposure energy. The average transmittance of the attenuation surface decreases from 95% to 8% linearly when the light incidence angle changes from 20° to 40°, and light energy loss of the other three faces are less than 1% in this system. Optical films are designed and fabricated with fused silica as substrate, and LaF<sub>3</sub> as well as AlF<sub>3</sub> as optical films. Experiments are performed to investigate the attenuator performance, and the results show that the light transmittance is continuously tunable in the range from 8% to 90%, which satisfies the requirements of the system. Compared with traditional optical variable attenuators, the device is with wider attenuation modulation range and more stable attenuation, and it has potential applications.

**Key words** thin films; deep ultraviolet lithography; variable optical attenuator; cutoff filters; optical coating

**OCIS codes** 310.6845; 050.1970; 110.3960; 120.4570

收稿日期: 2017-07-18; 收到修改稿日期: 2017-07-31

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61308051)、国家自然科学基金面上项目(91338116)

作者简介: 李美萱(1984—),女,博士研究生,讲师,主要从事微结构光学元件与薄膜波导术、光纤通信技术等方面的研究。E-mail: limeixuannuc@163.com

导师简介: 董连和(1953—),男,教授,博士生导师,主要从事先进光学系统设计与制造技术、微细加工理论与工艺技术、微光学与应用等方面的研究。E-mail: custdong@126.com(通信联系人)

# 1 引言

20世纪80年代16 Mb动态随机存储器(DRAM)的出现,标志着世界开始进入超大规模集成电路(VLSI)阶段,VLSI成为所有高科技领域发展的基础<sup>[1]</sup>。光刻技术是VLSI制造过程中的核心,决定了能够制作的元件大小,对集成电路的发展有巨大的贡献<sup>[2-4]</sup>。光刻系统中曝光量的大小对光刻图形质量的影响很大<sup>[5-7]</sup>。对于基于掩模的光刻设备,通常用准分子激光器,即采用几十个脉冲对衬底进行曝光<sup>[8]</sup>。使用准分子激光器的缺点是每个脉冲存在期望能量的 $\pm 10\%$ 能量波动。因此,采用快速控制算法和通过40~60个脉冲组成的曝光剂量,在衬底处将接收到的能量剂量变化要求控制在 $\pm 0.1\%$ 以内甚至更低。光可变衰减器通过控制系统光能透射效率,保证曝光量满足光刻需求,是光刻光学系统中不可缺少的必要环节<sup>[9]</sup>。

光可变衰减器中薄膜元件的光学性能好坏,特别是元件透射率和反射率的高低,直接影响到整个光刻系统的曝光质量<sup>[10-13]</sup>。另外,在激光的传输和放大过程中,高强度紫外激光比红外、可见激光更容易造成光学元件的损伤<sup>[14]</sup>。在193 nm波段,由于薄膜材料与基底材料的吸收、散射以及杂质等的影响,要想镀制高光学性能的薄膜元件是相当困难的<sup>[15]</sup>。本文提出采用两块角度可控的平行平板玻璃,在平板玻璃上镀制衰减膜和减反膜,从而实现对人射光能量的大范围平稳衰减。该衰减器具有较高

的激光损伤阈值,对改善最终的曝光质量具有重要的意义。

## 2 新型光可变衰减器系统设计

系统要对单个脉冲能量进行控制,采用的光源波长为193 nm,光源单脉冲能量最大为6.0 mJ,脉冲宽度最小为23 ns,光斑面积为 $11 \text{ mm} \times 2.05 \text{ mm}$ ,入射到元件表面的最大功率密度为 $11.57 \text{ kW/mm}^2$ 。由于功率密度大,故采用通过介质薄膜的反射衰减多余光能量的方案。因此,本研究提出了一种新型光可变衰减器结构,要求在193 nm波长处衰减器的工作稳定性较好。

光刻曝光系统如图1所示,ArF激光器为光刻曝光系统提供激光光源,光学延迟器在辐射脉冲输入到可变衰减器之前提供时间延迟,触发器校正由探测器测量到的辐射脉冲能量并将控制信号传送给新型可变衰减器。新型光可变衰减器的设计结构如图2所示,它由两块摆放位置相互对称的平板玻璃构成,前一个元件完成光束能量衰减,后一个元件完成补偿光束的横向漂移并稳定光束出射位置。为了衰减光能量,在面向光入射方向的一面镀介质反射膜(即衰减膜),其余三面为减少光能损失镀减反膜,通过改变两块平板玻璃的角度来调整入射光能量的大小。介质反射方式分为偏振分光和截止边分光两种方式。根据系统的设计指标要求,选用截止边分光作为衰减膜的设计方案。驱动和检测单元用于驱动玻璃平板的旋转和检测旋转角度。

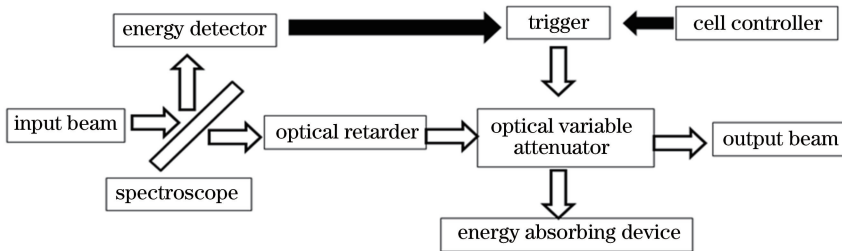


图1 光刻曝光系统示意图

Fig. 1 Schematic of lithography exposure system

## 3 材料选择与膜系设计仿真及制备

### 3.1 基底与膜料的选取

对193 nm波段的光学基底材料而言,为使其具备实用性,需要考虑两个主要问题,即基底材料对入射激光的吸收作用和激光对材料的损伤作用。目前,193 nm波段的光刻透镜材料主要采用紫外级熔融石英(JGS1)和氟化钙( $\text{CaF}_2$ )。其中,在 $\text{CaF}_2$ 透

镜上镀膜时热应力小,膜层不易开裂,但容易产生双折射现象,并且现有的 $\text{CaF}_2$ 透镜加工工艺不成熟;相比之下,JGS1具有更优良的光学及力学性能,加工工艺成熟,故系统采用JGS1作为基底材料。

适用于193 nm波段的光学膜层材料较少,常用介质膜料性能如表1所示。比较几种膜料的光学及力学性能,重点考察膜料的折射率、透明区、应力匹配、激光损伤阈值及膜料纯度等因素后,系统选用

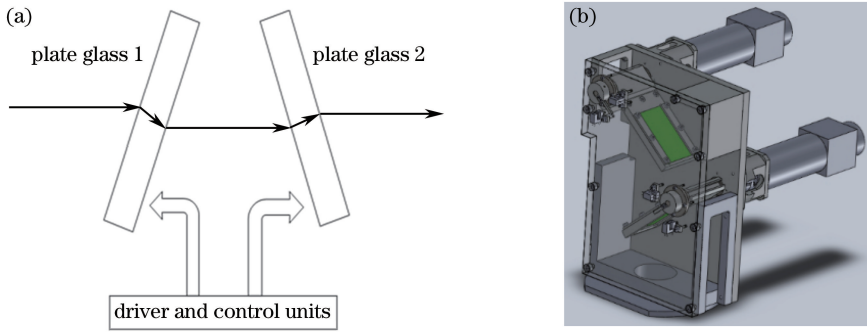


图 2 新型光可变衰减器结构示意图。(a)二维结构;(b)三维结构

Fig. 2 Structure diagram of the new optical variable attenuator. (a) Two-dimensional structure; (b) three-dimensional structure

表 1 193 nm 波长常用的镀膜材料特性

Table 1 Characteristic of common coating materials for 193 nm wavelength

| Optional material              | Refractive index | Transparent area / $\mu\text{m}$ | Melting point / $^{\circ}\text{C}$ | Evaporation temperature / $^{\circ}\text{C}$ |
|--------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|
| MgF <sub>2</sub>               | 1.40-1.45        | 0.11-10                          | 1266                               | 1540   |
| AlF <sub>3</sub>               | 1.40-1.45        | 0.2-20                           | 890                                | 900  |
| SiO <sub>2</sub>               | 1.45-1.55        | 0.2-9                            | 1700                               | 1600   |
| LaF <sub>3</sub>               | 1.60-1.65        | 0.2-12                           | 1490                               | 1490   |
| CaF <sub>2</sub>               | 1.65-1.75        | 0.3-5                            | 1460                               | 1350   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.70-1.80        | 0.2-8                            | 2020                               | 2100   |

CERAC 公司生产的 LaF<sub>3</sub> 和 AlF<sub>3</sub> 材料分别作为高/低折射率膜料。

新型光可变衰减器按图 2 结构设计,并对两块平板玻璃不同表面进行镀膜。当激光的入射角从 20°增加至 40°时,衰减面介质膜的无偏振透射率相应地从 95%降低至 8%且近似呈线性变化。为了避免机械干涉,增大入射光与反射光的夹角,初始入射角选为 20°。由于衰减器中除衰减面以外,还有三个表面会造成光能损失,因此衰减面的透射率需要达到 95%,其余三个面的透射率高于 99%时才能满足整个衰减器的最大透射率达到 90%的要求。

### 3.2 膜系的设计与仿真

新型光可变衰减器的膜系设计包括衰减膜和减反膜两部分。衰减膜采用的高/低折射率材料分别为 LaF<sub>3</sub> 和 AlF<sub>3</sub>,入射介质为空气,通过多次实验后可知,在 193 nm 波长处 LaF<sub>3</sub> 和 AlF<sub>3</sub> 的折射率分别为 1.69001 和 1.41880,消光系数分别为  $9.1 \times 10^{-4}$  和  $2.2 \times 10^{-4}$ ,光线入射角为  $20^{\circ} \leq \theta \leq 40^{\circ}$ 。

由薄膜理论可知,在基片上镀一层厚度为  $\lambda_0/4$  的高折射率( $n_1$ )介质薄膜,就能增加反射率。在中心波长  $\lambda_0$  附近较宽的波长范围内,该膜的反射率随波长的改变缓慢。中心波长  $\lambda_0$  处的反射率为一个极大值,该数值计算公式为

$$R_{\max} = \left( \frac{\eta_0 - \frac{\eta_1^2}{\eta_g}}{\eta_0 + \frac{\eta_1^2}{\eta_g}} \right)^2, \quad (1)$$

式中  $\eta_0$  为入射介质有效导纳, $\eta_1$  为膜层的有效导纳, $\eta_g$  为基片的有效导纳。

通过推导演算可知,对 P 分量和 S 分量可分别表示为

$$\begin{cases} \eta_0 = \frac{n_0}{\cos \theta_0}, \eta_1 = \frac{n_1}{\cos \theta_1}, \eta_g = \frac{n_g}{\cos \theta_g}, \\ \text{P polarization} \\ \eta_0 = n_0 \cos \theta_0, \eta_1 = n_1 \cos \theta_1, \eta_g = n_g \cos \theta_g, \\ \text{S polarization} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $\theta_0$  为光线的入射角, $\theta_1$  和  $\theta_g$  为膜系中光束在膜层和基片中的折射率, $n_0$ 、 $n_1$ 、 $n_g$  分别代表光线在入射介质、膜层和基片中的折射率。

根据该衰减膜的入射角要求和波动光学理论,当光以  $\theta$  角斜入射到薄膜上时,TH 波(P 偏振光)和 TE 波(S 偏振光)将呈现不同的有效折射率。根据光可变衰减器的设计要求,采用 TFCal 膜系设计软件,对反射膜的基础膜系 sub/ $\alpha$ (HL)s/air 进行优化设计,得到衰减膜的膜堆公式为 JGS1/1.0341H 1.1592L 0.9809H1.7232L0.7039H1.8723L0.9194H

1.2007L 1. 0011H1. 1596L1. 0236H1. 1584L1. 0261H 1.1863L 1. 0144H1. 2699L0. 9925H1. 4492L0. 9947H 1.3575L1.0178H1.2064L1.0431H1.146L1.0786H/air, 其中 H 为高折射率材料  $\text{LaF}_3$ , L 为低折射率材料  $\text{AlF}_3$ , 得到 193 nm 衰减膜透射率与入射角度的关系如图 3 所示。

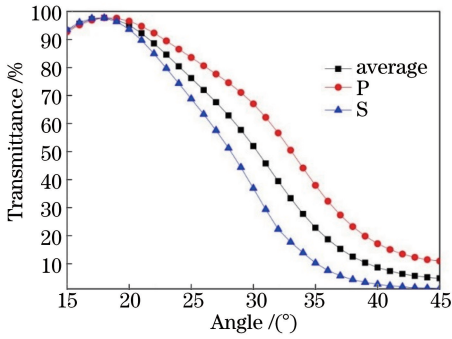


图 3 衰减膜透射率与入射角的关系

Fig. 3 Relationship between transmittance of attenuation films and incident angle

由图 3 可以看出,在入射角度从  $20^\circ$  变化到  $40^\circ$  的过程中, A 光、S 光和 P 光的变化趋势接近线性变化,其中在  $20^\circ \sim 35^\circ$  的变化过程中线性度最好,大于  $35^\circ$  后变化趋缓,但可以采用标定校正的方式进行修正。

同理,对减反膜进行设计。制备 193 nm 减反膜,应尽量使用较为简单的膜系,一方面薄膜厚度较小,可以减少吸收;另一方面工艺稳定性好。考虑光线入射角度和偏振效应的影响,在规整膜系 sub/LHL/air 基础上进行优化,得到最终膜系为 sub/59.99L26.2H 34.47L/air,其中 sub 为 JGS1, H 为  $\text{LaF}_3$ , L 为  $\text{AlF}_3$ 。193 nm 减反膜反射率与入射角度的关系如图 4 所示。

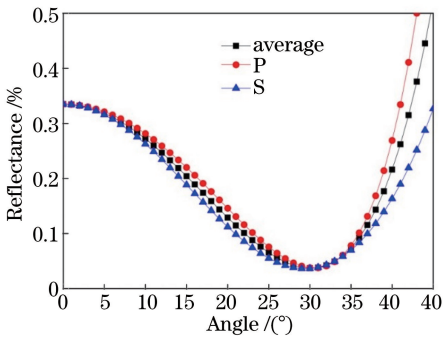


图 4 减反膜反射率与入射角的关系

Fig. 4 Relationship between reflectance of antireflective films and incident angle

由图 4 可知,优化后 193 nm 减反膜的反射率分布曲线的极值位置约在光入射角  $29^\circ$  处,入射角

为  $20^\circ \sim 35^\circ$  时,膜反射率均小于 0.2;入射角为  $35^\circ \sim 40^\circ$  时,反射率有所增大。总体来看,该减反膜基本符合设计要求,可以对大部分入射光透射,反射率总体平均值优于 0.1。在此基础上,对光入射角为  $20^\circ$  和  $40^\circ$  时波长对反射率的影响进行仿真,结果如图 5 所示。

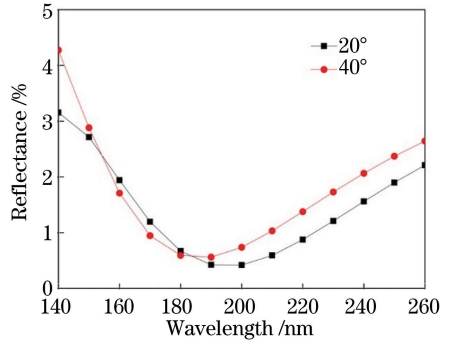


图 5 减反膜反射率与波长的关系

Fig. 5 Relationship between wavelength and reflectance of antireflective films

如图 5 所示,当光线入射角分别为  $20^\circ$  和  $40^\circ$  时, 193 nm 处反射率分别为 0.41% 和 0.8%,符合设计要求,可知在该膜层结构中波长对反射率的影响可以忽略不计,其反射率仅由调制角度所控制。

### 3.3 衰减膜和减反膜的制备

在理论计算与仿真分析的基础上,选用 SYRUSpro 1110 型真空镀膜机,采用热舟蒸发沉积方式制备衰减膜和减反膜。基底烘烤温度为  $310^\circ\text{C}$ ,真空度为  $3.0 \times 10^{-4}$  Pa,膜层厚度与膜料沉积速率监控采用石英晶体控制仪完成,  $\text{AlF}_3$  (低折射率材料) 和  $\text{LaF}_3$  (高折射率材料) 的沉积率分别为 0.37 nm/s 和 0.1 nm/s。

## 4 光可变衰减器透射率测试

选择抗干扰性强的双通道测试方法,对光可变衰减器进行透射率测试。

系统的测试原理如图 6 所示,193 nm 激光器发出的光束经过衰减器和小孔后,由某一固定分光比的分光镜分成两束光,分别进入测试光路和参考光路中,这两个光路的光信号分别由两个相同的光电探测器接收,产生与参考光路曝光量  $\phi_1$  和测试光路曝光量  $\phi_2$  相对应的电压值(包含各种背景光和噪声干扰),此电信号再经过放大去噪,最后进入信号处理系统进行运算处理。测试前需要对背景噪声、两个探测器的响应一致性、线性度等进行标定。

如图 6 所示,设分光镜的分光比为  $R$ ,光可变衰



减器系统的透射率为  $T$ , 测试时系统测试光路出射光通量对应的实测电压值为  $V_1$ , 参考光路光通量对应的实测电压值为  $V'_1$ , 则被测系统的透射率为

$$T = \frac{V_1}{V'_1} \cdot R. \quad (3)$$

当激光光源产生能量波动时, 实测光路和参考

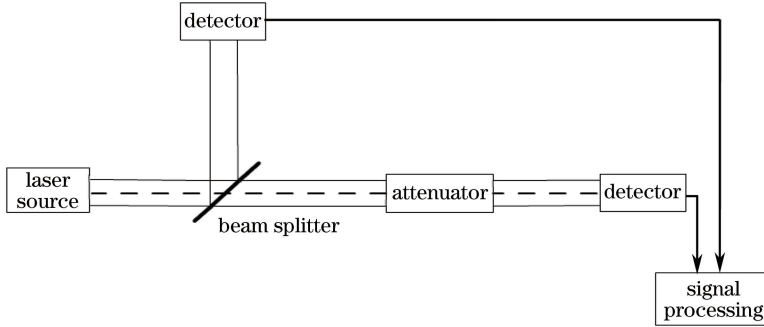


图 6 光可变衰减器透射率测试原理图

Fig. 6 Test schematic of optical variable attenuator transmittance

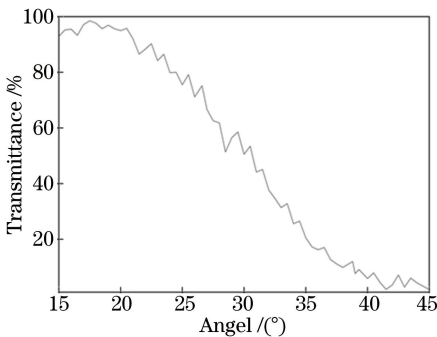


图 7 光衰减器在不同入射角度下的透射率

Fig. 7 Transmittance of attenuator at different incident angles

从图 7 可以看出, 在角度调制范围  $20^\circ \sim 40^\circ$  内, 光可变衰减器透射率的衰减变化基本呈线性规律, 由于实验误差也会存在个别测试点位偏离的现象。

实现了对光能透射率的线性调制, 进而即可达到调节曝光能量的目的。依据实验数据进行曲线拟合, 可得拟合方程为

$$y = -0.0397x + 1.6692, \quad (4)$$

式中  $x$  为角度值,  $y$  为透射率。

由实验结果可知该光可变衰减器的能量透射率在  $8\% \sim 90\%$  范围内连续可调, 且与两组平板玻璃的控制角度基本呈线性变化规律, 实验结果满足设计要求。

## 5 结 论

设计了一种新型光可变衰减器, 通过控制玻璃平板旋转角度实现对系统曝光能量的调节。对新型光可变衰减器表面的光学衰减膜和减反膜进行了设

计分析, 并在玻璃平板中分别蒸镀了两种深紫外光学衰减膜和减反膜, 分析了薄膜性能。选择抗干扰性强的双通道测试方法, 对光可变衰减器进行了透射率测试, 验证了系统在入射角为  $20^\circ \sim 40^\circ$  时光能透射率在  $8\% \sim 90\%$  范围内连续可调, 实验结果满足设计要求。与传统光可变衰减器相比, 所设计的新

型光可变衰减器的可调制衰减范围更大, 衰减量更稳定, 具有更为优越的性能和实用价值。

依据上述测试方法, 通过图 2(b) 中驱动和控制单元对玻璃平板的角度进行调制, 选择步进控制方式, 步长角度为  $0.5^\circ$ , 逐步测试并记录光衰减器对应的透射率, 测试结果如图 7 所示。

## 参 考 文 献

- [1] Sun J, Shao J D, Yi K, *et al.* Effects of substrate temperatures on the characterization of magnesium fluoride thin films in deep-ultraviolet region [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(7): 1298-1305.
- [2] Guo C, Kong M D, Gao W D, *et al.* Simultaneous determination of optical constants, thickness, and surface roughness of thin film from spectrophotometric measurements [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(1): 40-42.
- [3] Yuan Q Y, Wang X Z, Shi W J, *et al.* Development of immersion lithography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(8): 13-20.  
袁琼雁, 王向朝, 施伟杰, 等. 浸没式光刻技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(8): 13-20.
- [4] Liu Z T, Zhou J Y, Liu L X, *et al.* A new PCB digital lithograph projection imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 042203.  
刘志涛, 周金运, 刘丽霞, 等. 一种新型 PCB 数字光

- 刻投影成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 042203.
- [5] Liu G H, He H B, Jin Y X, *et al.* Electron beam evaporated LaF<sub>3</sub> thin films prepared by different temperatures and deposition rates [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(8): 2343-2346.
- [6] Yang M H, Gatto A, Kaiser N. Research and development of VUV optical coatings for micro mirror applications [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(4): 465-470.
- [7] Jia N N, Deng C L, Pang F F, *et al.* Research on excimer laser etching technology for achieving optical waveguide end face[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303012.  
贾娜娜, 邓传鲁, 庞拂飞, 等. 光波导端面的准分子激光刻蚀技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303012.
- [8] Al-Kuhaili M F, Khawaja E E, Durrani S M A. Determination of the optical constants ( $n$  and  $k$ ) of inhomogeneous thin films with linear index profiles [J]. Applied Optics, 2006, 45(19): 4591-4597.
- [9] Hu T G, Wu A Q, Liu Q H. The optical variable attenuators[J]. Study of Optical Communications, 1993(1): 22-26.  
胡台光, 吴爱清, 刘秋华. 光可变衰减器[J]. 光通信研究, 1993(1): 22-26.
- [10] Cho B, Lyu A, Feldman M. Laser-induced damage resistance of UV coatings on fused silica and CaF<sub>2</sub> [C]. SPIE, 2012, 8530: 853029.
- [11] Liu C D, Kong M D, Guo C, *et al.* Theoretical design of shadowing masks for uniform coatings on spherical substrates in planetary rotation systems[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23790-23797.
- [12] Wang L, Li S K, Wang X Z, *et al.* Source optimization using particle swarm optimization algorithm in optical lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0422002.  
王磊, 李思坤, 王向朝, 等. 基于粒子群优化算法的光刻机光源优化方法[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0422002.
- [13] Yan G Y, Li S K, Wang X Z. Source optimization method of lithography tools based on quadratic programming[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1022004.  
闫观勇, 李思坤, 王向朝. 基于二次规划的光刻机光源优化方法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1022004.
- [14] Liu G H, Yu H, Zhang W L, *et al.* Comparison study of microstructure, chemical composition and optical properties between resistive heating and electron beam evaporated LaF<sub>3</sub> thin films[J]. Thin Solid Films, 2011, 519(11): 3487-3491.
- [15] Zhang Y, Jin C S, Ma D M, *et al.* Measuring technology for wavefront aberration of EUVL objective system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3384-3389.  
张宇, 金春水, 马冬梅, 等. 极紫外光刻物镜系统波像差检测技术研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3384-3389.