

# 高精度深紫外光学透射率测量装置的研制

陈 明<sup>1,2</sup> 谢承科<sup>1</sup> 杨宝喜<sup>1</sup> 黄惠杰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了精确控制曝光剂量,需要精确测量光刻系统的光学透射率。采用了双光路对比的方法进行透射率测量,有效地消除了准分子激光器能量波动带来的透射率测量误差。并通过加入起偏器,消除了准分子激光器偏振态不稳定带来的误差。搭建了深紫外光学透射率测量装置,对1片可计算透射率的光学样品进行透射率测量,其测量结果与透射率理论计算结果基本一致。测量结果显示,该装置的测量重复性可达到0.3%。通过分光光度计对该光学样品进行测量,通过结果对比,该装置的测量结果与分光光度计的测量结果相差0.28%。另外,该装置应用灵活,可以测量光学系统的透射率,具有不受待测光学样品尺寸影响的优点。

**关键词** 物理光学; 深紫外; 透射率测量; 双路对比; 重复性; 高精度

**中图分类号** TH741; TN23; TH247

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0308002

## Development of Device for High-Precision Deep Ultraviolet Optical Transmittance Measurement

Chen Ming<sup>1,2</sup> Xie Chengke<sup>1</sup> Yang Baoxi<sup>1</sup> Huang Huijie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to accurately control the exposure dose, it is necessary to measure optical transmittance of lithography system accurately. A double-contrast method of optical transmittance measurement is introduced. It effectively eliminates the measurement error caused by an excimer laser energy fluctuation. In order to eliminate the measurement errors caused by diversification of excimer laser polarization, a polarizer is used in this equipment. The experimental setup is designed to measure the transmittance of an optical sample whose transmittance can be calculated accurately. The experimental results show that measurement results are consistent with theoretical calculations and the repeatability of measurement is less than 0.3%. The transmittance of optical sample is measured by the spectrophotometer, and the difference between the two kinds of equipment is 0.28%. Furthermore, the equipment has flexible application for transmittance measurement of optical system and advantage for not influenced by optical sample sizes.

**Key words** physical optics; deep ultraviolet; transmittance measurement; double-contrast; repeatability; high-precision

**OCIS codes** 260.7190; 110.5220; 250.0040

### 1 引 言

深紫外(UV)光学多应用于激光剥蚀系统,医疗手术等领域,在光刻领域应用尤其广泛。回顾光刻机的发展,为了缩短曝光波长以提高光刻分辨率,曝光光源已从436 nm和365 nm紫外与近紫外汞灯发展到目前的248 nm和193 nm深紫外准分子激光器,再发展到13.5 nm的极紫外光源<sup>[1-4]</sup>。在目前的光刻机市场上,主流的高端光刻机依然是深紫外光刻机。其光学系统和组件的透射率对曝光过程中的剂量控制有着重要的影响,

收稿日期: 2015-08-17; 收到修改稿日期: 2015-10-12

作者简介: 陈 明(1983—),男,博士研究生,主要从事高NA光刻技术方面的研究。E-mail: chenming@siom.ac.cn

导师简介: 黄惠杰(1966—),男,博士,研究员,主要从事光学生物传感器、光学检测技术、光学光刻技术等方面的研究。

E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn(通信联系人)

而曝光剂量的大小直接关系到光刻工艺的质量,因此,精确测量深紫外光刻机系统或元件的透射率对光刻曝光剂量控制有着重要的意义<sup>[5-6]</sup>。可见光透射率的测量技术已经趋于成熟,但是由于深紫外光源波长较短,其透射率的测量难度也随之而来。目前,对于主流的深紫外光刻系统的透射率测量<sup>[7-9]</sup>,相关的报道很少。在已有的可见光学透射率测试方案中,其光学透射率测试装置一般采用单通道方法,这也是大多数光学系统透射率测试所采用的方法,先经过空测,再进行实测,将两次的结果相除,得到透射率的测量结果<sup>[10]</sup>。该方法的问题是测量精度容易受到环境和光源波动误差的影响。美国Perkinelmer公司生产的紫外分光光度计就是利用这种方法,该装置可以测量光学平板的透射率,其测量波长范围175~3300 nm,透射率测量精度优于1%;另外还有德国汉诺威公司生产的真空紫外光谱仪,测试波长范围130~300 nm,其透射率测试标准偏差为1%。由于上述国外的测试设备的测量空间狭小,一般只能用于测量光学平板的透射率,对于大尺寸光学元件的透射率测试,上述仪器无法实现测试功能。

本文介绍一种深紫外光学透射率的测量装置的研制方案,对于功能组件多,结构复杂,体积较大的深紫外光学系统或元件都能够测量。该装置采用双路对比的方法进行测量,具有测量重复性好、精度高、应用灵活、不受待测光学样品尺寸影响等优点。

## 2 深紫外光学透射率测量原理及装置组成

深紫外光刻机的光源大多是准分子激光器,且准分子激光器发出的脉冲能量波动很大,一般能量波动在±20%的范围<sup>[11-14]</sup>,因此为了测准待测样品的透射率,需要消除准分子激光器发射能量波动带来的影响。

深紫外光学系统透射率测量原理图如图1所示,光源发出的光束,经过分光镜,分成2路光束,1路为参考光路,1路为测量光路,设光源的总能量为 $\Phi$ ,分光镜的反射率为 $r$ ,那么分光镜的透射率为 $(1-r)$ 。设探测器1探测到的能量为 $E_1$ ,探测器2探测到的能量为 $E_2$ 。先将待测样品移开测量光路,进行测量,可以得到探测器1和探测器2探测到的能量 $E_1$ 和 $E_2$ ,

$$E_1 = \Phi_1 \times (1 - r), \quad (1)$$

$$E_2 = \Phi_1 \times r. \quad (2)$$

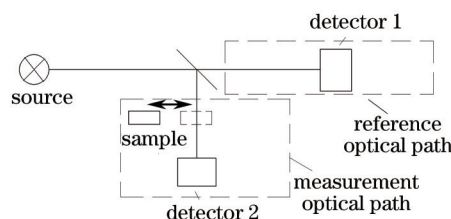


图1 深紫外透射率测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of deep UV optical transmittance measurement

再将待测样品放入测量光路,再次进行测量,得到探测器1和探测器2探测到的能量:

$$E'_1 = \Phi_2 \times (1 - r), \quad (3)$$

$$E'_2 = \Phi_2 \times r \times T_{\text{sample}}, \quad (4)$$

式中 $T_{\text{sample}}$ 是待测样品的透射率,利用(1)式除以(2)式得到

$$\frac{r}{1 - r} = \frac{E_2}{E_1}, \quad (5)$$

利用(3)式除以(4)式得到

$$\frac{T_{\text{sample}} \times r}{1 - r} = \frac{E'_2}{E'_1}, \quad (6)$$

利用(6)式除以(5)式得到

$$T_{\text{sample}} = \frac{E_1 \times E'_2}{E'_1 \times E_2}, \quad (7)$$

式中 $E_1$ ,  $E'_1$ ,  $E_2$ 和 $E'_2$ 都是能测到的已知量,由此可以获得样品的透射率 $T_{\text{sample}}$ 。

上式介绍的是单脉冲的计算方法,实验中也可以采集多个脉冲平均后对透射率进行测量,以提高测量精度。其计算公式为

$$T_{\text{sample}} = \frac{\overline{E_1} \times \overline{E_2'}}{\overline{E_1'} \times \overline{E_2}}, \quad (8)$$

式中  $\overline{E_1}$ ,  $\overline{E_2}$ ,  $\overline{E_1'}$ ,  $\overline{E_2'}$  是  $N$  个脉冲的平均值。上述就是深紫外光学透射率双光路对比的测量原理,该方法采用了双路对比的测试方法,消除了激光器能量波动带来的影响,提高了测量精度。与此同时,图1中的探测器1和探测器2的位置可以根据待测样品的尺寸和位置进行调整和移动,增加了测量的灵活性。

对深紫外光学透射率测量装置的实际组成进行介绍。该测量装置结构简图如图2所示,测量装置由准分子激光器、准直镜、小孔、起偏器、衰减器、分光镜、探测器1、探测器2、采集卡和电脑组成。其中准分子激光器作为测量光源,由于准分子激光器的出射光束有一定的发散角,所以需要用准直镜对准分子激光器出射的光束进行准直。在准直镜后面放置1个小孔,用于取样一部分准直的光束,由于待测的光学系统具有会聚或发散光束的特性,所以该装置只对待测样品的近轴透射率进行测量。实验中,利用小孔对扩束后光束取样,以减小待测光学系统会聚或发散准直光束带来的影响,小孔后面是起偏器,用于将准分子激光器发射的光束起偏,形成偏振性较好的光束,其原因是激光器发出的光束的偏振态不稳定,导致分光镜的分光比不稳定,造成测量精度下降。分光镜将光束分成相互垂直的2路,其中探测器1作为参考光路,探测器2作为测量光路。测量时,先不放入待测样品进行1次测量,将探测器1和探测器2的测量结果  $E_1$  和  $E_2$  保存,再将样品放入测量光路,进行1次测量,将探测器1和探测器2的测量结果  $E_1'$  和  $E_2'$  保存,通过计算两次测量的比值,利用(1)~(7)式,计算出待测样品的透射率。

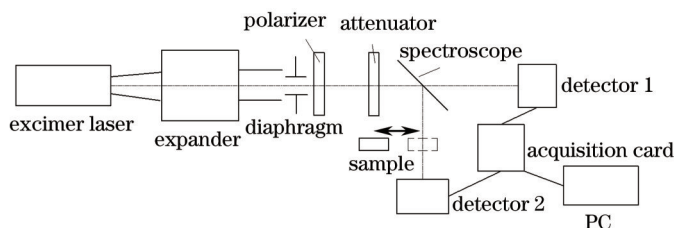


图2 深紫外光学系统透射率测量装置简图

Fig.2 Schematic diagram of device for deep UV optical transmittance measurement

### 3 深紫外探测器设计与性能测试

目前,商用深紫外能量探测器很少,且测量精度不高,因此自主研发了深紫外能量探测器,并对其性能进行了测试。

#### 3.1 光路设计

由于被测试的光学元件或光学系统都具有会聚或发散的特性,即使测试近轴透射率,平行光束经过待测件后仍然有一定的发散角,且光电二极管的接收靶面较小,如此会导致待测样品放入光路前后深紫外探测器接收到的光束不一致,引起测量误差。因此设计了深紫外探测器的光学系统,如图3所示,其中包括聚光镜、积分棒、转换晶体 YAG:Ce、滤光片和光电二极管。聚光镜可将一定发散或会聚角度的光束收集到积分棒当中,积分棒起到匀光器的作用,将入射光束进行均匀化后并投射到转换晶体 YAG:Ce 上。由于现有的深紫外光电二极管性能不佳,且深紫外光长期照射光电二极管会导致光电二极管靶面损伤,因此需要将深紫外光转换成可见光进行探测,转换晶体 YAG:Ce 被应用在本文探测器的设计当中,滤光片能够透射可见

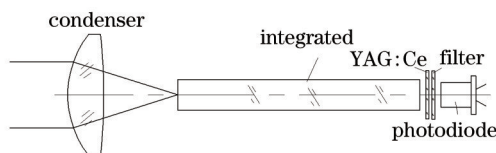


图3 深紫外能量探测器光学系统原理图

Fig.3 Schematic illustration of optical system for deep UV energy detector

光,并能够阻挡透过转换晶体的深紫外光束进入光电二极管。

### 3.2 信号处理电路设计

如图4所示,能量探测器的信号处理电路由前置放大电路、脉冲整形电路和主放大电路3部分组成。当准分子深紫外激光脉冲经过转换晶体转换成可见光脉冲照射到光电二极管后,产生了一个脉冲电流信号,该信号经过前置放大电路转换为电压脉冲信号。由于准分子深紫外激光脉冲信号只有几十纳秒,如果直接放大前置放大电路输出的窄脉冲信号,则需要整个信号处理电路有很高的带宽,这不仅会增加信号采集的难度,还会降低系统的信噪比。因此,该设计采用二阶有源低通滤波电路对前置放大电路输出的窄脉冲信号进行展宽处理,使脉冲信号能够达到几十微秒,以便后续的电电压信号采集。主放大电路的作用是将电压信号放大到信号采集器的最大输入电压值,以便尽可能提高系统的信噪比。

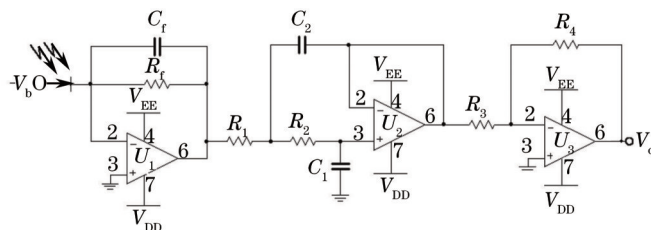


图4 深紫外能量探测器电路原理图

Fig.4 Circuit schematic of deep UV energy detector

### 3.3 深紫外探测器性能测试

结合上述设计方案,完成了深紫外探测器的研制,并对其性能进行了测试,其测试装置采用双路对比的方法,其测试光路与图2中不放入样品的光路一致,测量装置由准分子激光器、准直镜、小孔、起偏器、分光镜、可变衰减器、探测器1、探测器2、采集卡和电脑组成。测量探测器重复性时,仍然采用双路测量的方法,以此消除准分子激光器能量波动的影响。测试了100个脉冲能量,在探测器1和2处,可以分别得到 \$E\_{i1}, E\_{i2}, \dots, E\_{i100}\$ 和 \$E\_{r1}, E\_{r2}, \dots, E\_{r100}\$。令 \$x\_1=(E\_{i1}/E\_{r1}), x\_2=(E\_{i2}/E\_{r2}), \dots, x\_{100}=(E\_{i100}/E\_{r100})\$, 计算 \$x\_1, x\_2, \dots, x\_{100}\$ 这100组数据的重复性,以此获得探测器的重复性性能。重复性公式中 \$\bar{x}\$ 为 \$x\_1, x\_2, \dots, x\_{100}\$ 的平均值,则通过

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{100-1} \sum_{i=1}^{100} (x_i - \bar{x})^2}}{\frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} x_i}, \quad (9)$$

计算得到能量探测器的单脉冲重复性为0.32%,结果如图5所示。

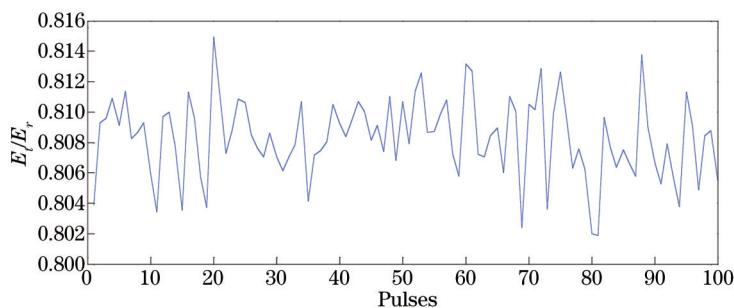


图5 能量探测器单脉冲重复性测量结果

Fig.5 Repeatability measuring result of detector under the condition of single pulse

为了提高重复性精度,对多个脉冲进行积分后,再进行重复性的计算,重复性有了明显的提高。测试了5000个脉冲,将这5000个脉冲分成100组,每组选取50个脉冲进行积分,每组积分后的值作为 \$E\_{i1}, E\_{i2}, \dots, E\_{i100}\$ 和 \$E\_{r1}, E\_{r2}, \dots, E\_{r100}\$。再令 \$x\_1=(E\_{i1}/E\_{r1}), x\_2=(E\_{i2}/E\_{r2}), \dots, x\_{100}=(E\_{i100}/E\_{r100})\$, 计算 \$x\_1, x\_2, \dots, x\_{100}\$ 这100组数据的重复性,得到积分后重复性为0.052%,如图6所示。

再次测试了10000个脉冲,将这10000个脉冲分成100组,每组选取100个脉冲进行积分,每组积分后的值作为 \$E\_{i1}, E\_{i2}, \dots, E\_{i100}\$ 和 \$E\_{r1}, E\_{r2}, \dots, E\_{r100}\$。再令 \$x\_1=(E\_{i1}/E\_{r1}), x\_2=(E\_{i2}/E\_{r2}), \dots, x\_{100}=(E\_{i100}/E\_{r100})\$, 计算 \$x\_1, x\_2, \dots, x\_{100}\$ 这100组

数据的重复性,得到积分后重复性为0.036%,如图7所示。结果显示通过增加脉冲积分的数量,能够提高测量重复性。

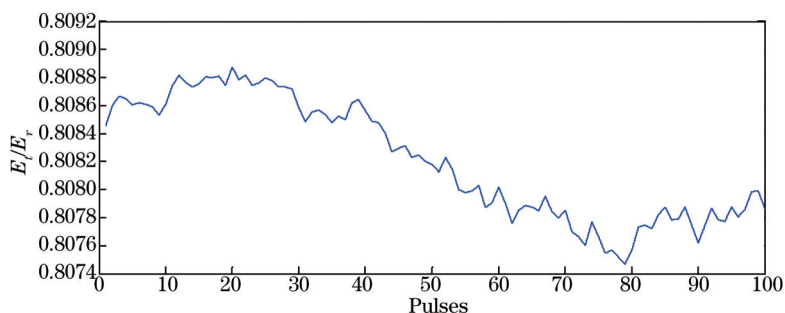


图6 能量探测器50个脉冲积分重复性测量结果

Fig.6 Repeatability measuring result of detector under the condition of 50 pulses integration

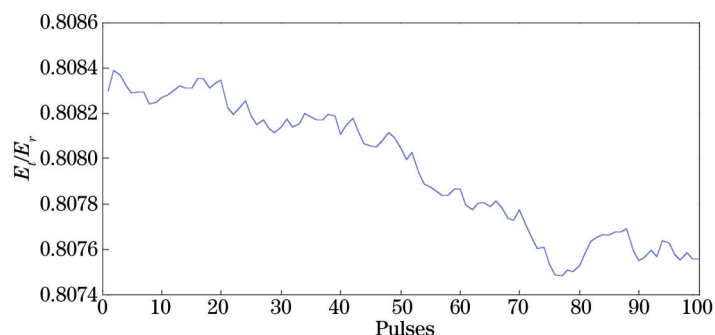


图7 能量探测器100个脉冲积分重复性测量结果

Fig.7 Repeatability measuring result of detector under the condition of 100 pulses integration

#### 4 深紫外光学透射率测量装置验证实验

图8是深紫外光学系统透射率测试装置的实物图。图中1:准分子激光器(193 nm),2:扩束镜,3:小孔,4:起偏器,5:衰减片,6:分光镜,7:探测器1,8:待测样品,9:探测器2,10:采集卡,11:电脑。实验中,准分子激光器使用的是ATL Lasertechnik公司的ATLEX-300-SI-193,其中心波长为193.368 nm,最大重复频率为300 Hz,单脉冲最大能量为8 mJ,脉冲宽度为6 ns,使用的信号采集卡是NI公司的USB-6356,其模数转换器(ADC)的分辨率为16 bit。

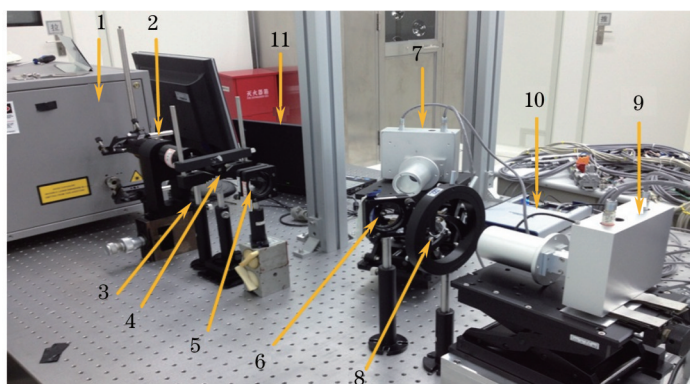


图8 实验实物图

Fig.8 Experimental setup

为了验证该测试装置的测量精度,选择一个可计算透射率的样品进行测量。待测样品选择了康宁熔石英材料的光学平板,直径为30 mm,厚度为2 mm,已知该材料在 $\lambda=193.368$  nm下的折射率 $n=1.560208$ ,内部透射率在波长为193.368 nm的情况下为每厘米99.5%。垂直入射的情况下,根据菲涅耳公式,其理论透射率为

$$T_{\text{silica}} = \left[ 1 - \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right]^2 \times (0.995)^{0.2} \times 100\% = 90.56\%, \quad (10)$$

式中  $T_{\text{silica}}$  是该样品的透射率,  $n$  是该样品在  $\lambda=193.368\text{nm}$  下的折射率。对该熔石英光学平板的透射率进行了 10 次测量, 测量结果如表 1 所示。

表 1 熔融石英光学平板样品 10 次透射率测量结果

Table 1 Ten times transmittance measurement results of fused silica optical plate sample

Measurement times	Time 1	Time 2	Time 3	Time 4	Time 5	Time 6	Time 7	Time 8	Time 9	Time 10
Measurement results	0.895733	0.896773	0.898146	0.898860	0.898730	0.896318	0.897868	0.897721	0.898193	0.897721
Mean result	0.897503		Stdev		0.001062		Stdev/Mean result		0.001184	

待测样品经过多次测量, 其平均透射率为 89.7503%, 标准偏差为 0.1062%, 相对标准偏差为 0.1184%。由平均透射率可以看出, 其平均透射率略小于理论计算值, 其原因是光学平板表面粗糙度对光线的吸收或材料内部的气泡或疵病导致透射率下降; 由标准偏差可以看出, 多次透射率测试结果的重复性很稳定, 证明该深紫外透射率测试装置的重复性较好。图 9 是美国 Perkinelmer 公司的紫外分光光度计对同一块熔石英光学平板玻璃透射率的测量结果, 其测量结果在波长 193.368 nm 下, 透射率为 89.474%。而本文搭建的测量装置的测试结果为 89.7503%, 通过对比, 可以看出两者的测量结果很接近。

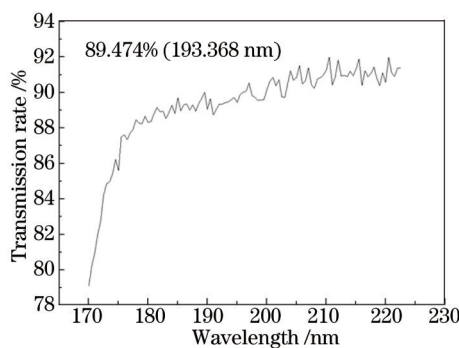


图 9 Perkinelmer 公司紫外分光光度计对同一块熔石英光学平板透射率测量结果

Fig.9 Transmittance measurement results of the same fused silica optical plate sample by the spectrophotometer of Perkinelmer

## 5 结 论

采用双路对比的原理对深紫外光学透射率进行测量, 该方法能够消除深紫外光源波动对透射率测量的影响, 提高了测量精度。通过实验结果可以发现, 该深紫外透射率测量装置测量重复性好、精度高、应用灵活、不受待测光学系统体积和位置的影响, 该测量系统的单脉冲测量重复性可达到 0.3%。通过对一个已知透射率的待测样品进行多次测量, 其透射率测量值与透射率理论计算值差距不大, 并通过与分光光度计的测量结果进行对比, 发现测量结果相差 0.28%, 结果基本相同。

另外, 由于光学系统一般具有会聚或发散光束的特性, 所以平行光束经过光学系统后有一定的发散角, 为了避免过大发散角度的光线对探测器测量精度带来影响, 该测量装置目前只能测量深紫外光刻光学系统或元件的轴上透射率。

## 参 考 文 献

- 1 B Fay. Advanced optical lithography development, from UV to EUV[J]. Microelectronic Engineering, 2002, 61: 11-24.
  - 2 M Switkes, R R Kunz, R F Sinta, et al.. Immersion liquids for lithography in the deep ultraviolet[C]. SPIE, 2003, 5040: 690-699.
  - 3 Wang Fan, Wang Xiangzhao, Ma Mingying, et al.. An novel technique for measuring full image quality of lithography tools *in situ*[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(4): 543-548.
- 王 帆, 王向朝, 马明英, 等. 一种新的光刻机多成像质量参数的原位检测技术[J]. 中国激光, 2006, 33(4): 543-548.

- 4 Guo Liping, Huang Huijie, Wang Xiangzhao. Off-axis illumination for optical lithography[J]. Laser Journal, 2005, 26(1): 23-25.  
郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 光学光刻中的离轴照明技术[J]. 激光杂志, 2005, 26(1): 23-25.
- 5 Zhang Qiang, Hu Song, Yao Hanmin, *et al.*. Current progress of optical lithography in ASML[J]. Microfabrication Technology, 2002, 9(3): 8-11.  
张 强, 胡 松, 姚汉民, 等. ASML公司光学光刻技术最新进展[J]. 微细加工技术, 2002, 9(3): 8-11.
- 6 Xing Shasha, Liao Zhijie, Lin Wumei. A lighting all systems and components in lithography transmittance measurement method: CN, 103345129 A[P]. 2013-10-09.  
邢莎莎, 廖志杰, 林妩媚. 一种光刻机中照明全系统及各组件透过率的测量方法: 中国, 103345129 A[P]. 2013-10-09.
- 7 Yuan Qiongyan, Wang Xiangzhao. Recent development of international mainstream lithographic tools[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(1): 57-64.  
袁琼雁, 王向朝. 国际主流光刻机研发的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 57-64.
- 8 Gong Yan, Zhang Wei. Present status and progress in 193 nm exposure system in lithography[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2008, 1(1): 25-34.  
巩 岩, 张 巍. 193 nm光刻曝光系统的现状及发展[J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1): 25-34.
- 9 Yu Yinshan, You Libing, Liang Xu, *et al.*. Progress of excimer lasers technology[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2253-2270.  
余吟山, 游利兵, 梁 勛, 等. 准分子激光技术发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2253-2270.
- 10 Lu Jing. The Testing Technology Study for the Optical Capability of Visible Light Transmittance[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008: 1-5.  
路 婧. 光学系统可见光透过率测试技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008: 1-5.
- 11 D H Tracy, F Y Wu. Exposure dose control techniques for excimer laser lithography[C]. SPIE, 1988, 922: 437-443.
- 12 Liu Shiyuan, Wu Xiaojian. Real-time exposure dose control algorithm for DUV excimer lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 878-884.  
刘世元, 吴小健. 深紫外准分子激光实时曝光剂量控制算法研究[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 878-884.
- 13 Cai Yanmin, Wang Xiangzhao, Huang Huijie. Design of Wollaston prism used for polarization illumination system in ArF lithography tool[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0616002.  
蔡燕民, 王向朝, 黄惠杰. 用于ArF光刻机偏振照明系统的沃拉斯顿棱镜的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0616002.
- 14 Chen Jinxin, Xu Xiangyu, Wang Yu. Electrodes system design and electric field simulation research of ArF excimer laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011402.  
陈进新, 徐向宇, 王 宇. ArF准分子激光光源电极系统设计及电场仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011402.

栏目编辑: 何卓铭