

激光与光电子学进展

准分子激光光刻光源关键技术及应用

江锐^{1,2*}

¹中国科学院北京微电子研究所光电技术研发中心, 北京, 100029;

²北京科益虹源光电技术有限公司, 北京, 100176

摘要 准分子激光光源在光刻、工业制造、医疗和科研领域都有广泛的应用,特别是其波长、线宽、能量与剂量等指标在光刻领域有很大的优势,可以为光刻机带来更小的图像分辨率和更均匀的曝光图形。现阶段准分子激光器已用于 7 nm 光刻工艺,并日趋完善,带来更低的运营成本、更高的产率和产量,从而推动整个半导体制造产业的发展。首先简单介绍了准分子激光原理,回顾了准分子激光的发展历史,调研了准分子激光在光刻上的应用现状,及国外准分子光刻光源的主流机型,继而重点阐述了部分应用在光刻中的准分子激光器的关键技术,并展望了准分子激光在光刻及集成电路制造其他环节应用的未来趋势,为我国准分子激光的自主可控发展提供有益借鉴。

关键词 光学设计与制造; 准分子激光; 光刻; 能量与剂量; 中心波长与线宽

中图分类号

文献标志码

DOI: 10.3788/LOP202259.0922020

Key Technologies and Applications of Excimer Laser as Light Sources in Lithography

Jiang Rui^{1,2*}

¹Optoelectronic Technology R&D Department, Beijing Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

²Beijing RSLaser Opto-Electronics Technology Co., Ltd, Beijing 100176, China

Abstract Excimer lasers are widely used in lithography, industrial manufacturing, and medical and scientific fields. Particularly, their indexes such as wavelength, linewidth, energy and dose have great advantages in the field of lithography, therefore can help the lithography machine to obtain smaller image resolution and smoother light exposure. Now excimer lasers have already been used in 7 nm node in semiconductor manufacturing, and are still improving to drive for the lower cost-of-ownership and higher productivity and yield, which promote the development of the whole semiconductor manufacturing industry. Firstly, this paper briefly introduces the principle of excimer lasers, reviews the development history of excimer lasers, investigates the application status of excimer laser in lithography and the mainstream models of foreign excimer lithography light sources, and then focuses on some key technologies of excimer lasers used in lithography. The future trend of applications of excimer lasers in lithography and other links of integrated circuit manufacturing is prospected, which provides a useful reference for the independent and controllable development of excimer lasers in China.

Key words optical design and fabrication; excimer laser; lithography; energy and dose; center wavelength and linewidth

收稿日期: 2022-02-10; 修回日期: 2022-03-10; 录用日期: 2022-04-10

通信作者: *jiangrui@ime.ac.cn

1 引言

世界经济发展与集成电路密不可分,随着我国经济发展和对集成电路产业重视程度的提高,光刻产业的发展已成为半导体行业的焦点。众所周知,先进光刻设备需要先进光源技术作为基础,准分子激光器作为主流光刻机光源,在大规模集成电路光刻制造环节起着至关重要的作用,所以有必要对准分子激光技术进行更深入地探索 and 开发。本文从介绍准分子激光原理开始,对准分子激光器的发展历史、在光刻中的应用历程和现状进行了分析,介绍了国外准分子光刻光源的主流机型,进一步重点阐述了部分应用在光刻中的准分子激光器的关键技术,并展望了准分子激光在光刻及集成电路制造其他环节应用的未来趋势,最后指出我国光刻准分子光源在发展的同时所面临的机遇和挑战。

2 准分子激光的原理和发展历程

2.1 准分子激光原理概述

准分子 excimer 是 excited dimer 的缩写,最初是指在激发状态下保持亚稳定、由两个相同原子组成的分子,后来则扩展到包括由不同原子组成的亚稳定分子。本文只讨论准分子激光应用中由惰性气体元素和卤族元素组成的准分子 (rare-gas-halide excimer), 该类型准分子是由两个不同原子组成的二元分子,其中一个原子是卤素原子,另一个原子是惰性气体原子^[1]。准分子激光器是最重要的紫外和深紫外波段激光器,惰性气体和卤素气体结合的混合气体在几十纳秒的高电压放电下产生激发态的稀有气体-卤族元素分子,如 ArF^* , KrF^* , XeF^* , XeCl^* 等,这些被称之为准分子是因为这些分子只有在激发态中才能存在,而其基态能级表现为排斥态 (repulsive state), 因而会迅速解离。以 ArF^* 准分子激光为例,当给工作气体施加高压放电脉冲后,会发生如图 1 所示几个步骤的化学反应:首先通过电离过程形成 Ar^+ 和 F^- 以及 Ar^* 和 F , 带电离子和激发态原子在缓冲气体的帮助下形成 ArF^* 准分子。准分子态弛豫时间一般在毫秒量级,然后跃迁至基态,不稳定基态迅速解离成单原子,并在此过程中发生自发或受激辐射,形成深紫外波段的光子。F 原子在这个过程中会缓慢重新组合形成 F_2 分子。具体如下:

1) 电子附着

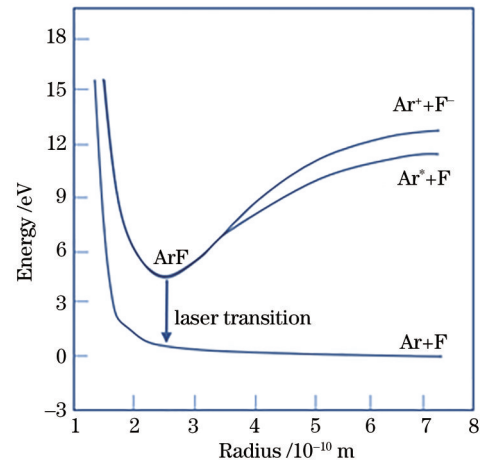


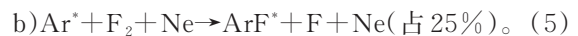
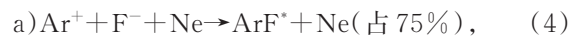
图 1 ArF 准分子激光势能原理图^[1]

Fig. 1 Schematic diagram of potential energy for ArF excimer laser^[1]

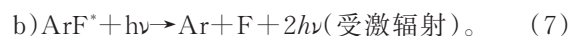
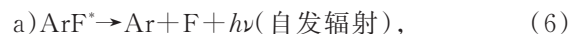
2) 两步电离



3) 准分子态的形成



4) 自发和受激辐射



5) 重新组合 (慢过程)



同时,整个过程还会伴随如下吸收反应。吸收反应是不利于受激辐射过程的,因此放电腔中 F_2 浓度必须在整个过程中得到精确控制; F_2 浓度过低会导致准分子激发态形成不充分而降低发光效率,但是偏高的 F_2 浓度一样会因为吸收反应降低发光效率。

吸收反应如下:



2.2 准分子激光发展历程

回顾准分子激光发展历程,在全球几代科学家的努力下相继取得了多项重大科技成果。1970年, Basov 等^[2]在莫斯科物理学院通过实验第一次得到了准分子激光,他们用 800 keV 的电子束和液体 Xe 得到了由两个 Xe 原子组成的准分子。1974年,很多机构开始对惰性卤素的荧光谱进行研究^[3],这其中包括英国剑桥大学、美国堪萨斯州立大学和美国 Avco Everett 研究实验室。1975年,美国几个实验室几乎在同一时间都研究得到了由不同原子混合

的准分子激光脉冲^[4-5],分别是海军实验室、Northrop 实验技术中心、Avco Everett 研究实验室和 Sandia 实验室,他们对早期准分子激光器的发展做出了很大的贡献。其中 Ralph Burnham 和 Nick Djeu 就是在海军实验室得到混合了不同原子的准分子激光(严谨来说为 exciplex laser),也就是现在的准分子激光。Djeu 在 Ralph 的帮助下尝试了脉冲横向放电,通过 98:1.5:0.5 的比例混合 He、Xe、NF₃,腔压为 39996.6 Pa,最终得到了单脉冲能量 7 mJ 的激光束

输出,实验中放电电流为 4000 A,脉冲提升时间为 20 ns。随后,Sandia 实验室的 Hoffman、Hays 和 Tisone 也经过实验成功得到了高功率 193 nm 波长的 ArF 准分子激光。到 1975 年底,随着准分子激光技术的飞速发展,在全球科学家的努力下,所有紫外波长下的准分子激光器都被实验所验证,各准分子激光对应的波长如表 1 所示,准分子激光器的发展历史如表 2 所示。

表 1 不同准分子气体对应的波长

Table 1 Wavelengths of different excimer lasers

| Excimer | Halogen | | | Excimer laser gas mixture | | | |
|----------------|----------------|-----|------|---------------------------|------|------|-----------|
| | F ₂ | ArF | KrCl | KrF | XeBr | XeCL | XeF (B-X) |
| Wavelength /nm | 157 | 193 | 222 | 248 | 262 | 308 | 351 |

表 2 准分子激光器的发展历史

Table 2 Development history of excimer lasers

| Year | Research institution | Landmark of progression |
|------|---|---|
| 1970 | Lebedev Physical Institute in Moscow | The first excimer lasing was invented |
| 1974 | University of Cambridge, Cambridge, UK; Kansas State University, Kansas, USA; Avco Everett Research Laboratory, Everett, Massachusetts, USA | The fluorescence spectra of rare-gas halides were investigated |
| 1975 | Naval Research Laboratory, Washington, USA; Northrop Research and Technology Center, Hawthorne, USA; Avco Everett Research Laboratory, Everett, Massachusetts, USA; Sandia Laboratories, Albuquerque, USA | The first laser of exciplexes was demonstrated |
| 1979 | Lambda Physik | The first commercial excimer laser system was developed |
| 1980 | IBM | Jain proposed the concept of excimer laser on lithography |
| 1980 | IBM | The lithographic exposure experiment by excimer lasers in contact mode was carried out |
| 1982 | IBM | With the modified Micralign system, the projection lithography by excimer laser was experimentally demonstrated |

相比可见光而言,准分子激光具有更短的波长,可以得到更高能量级别、更高分辨率的图像,这些因素都促进了商用准分子激光的发展。1979年,Lambda Physik 公司生产出第一台商用准分子激光器 EMG500^[1]。1980年,IBM 的 Jain^[6]提出了准分子激光用于光刻的概念,同年分别使用了 3 台不同的准分子激光光源(XeCl、KrF、KrCl)去验证接触模式的光刻效果,最后实验都很成功。实验证明了准分子激光可以用于大规模的光刻生产,短波长能够带来高分辨率的成像效果,高输出功率会带来高剂量的曝光和更快的生产率,高转换效率可以降低成本,同时低相干性能够使最后成的像非常均匀。1982年,在 Micralign-500 光刻系统的

配合下,准分子激光第一次在投影光刻系统得到了验证,采用 Lumonics Model TE-860,使用 XeCl 光源在 125 mm 的硅片上曝光精度可以达到 1 μm。

20 世纪 80 年代,除了之前提到的 Lambda Physik 和 Lumonics,全球还有其他几家公司也开始开展准分子激光器的生产和制造。1986 年毕业于加州圣地亚哥大学的 Robert Akins 博士和 Richard Sandstorm 博士在美国建立了 Cymer 公司。1988 年,Cymer 成功研发了应用在半导体光刻机的第一代光源,并于 1990 年又研发制造了第二代光源,到 2002 年底就已经生产和制造了 2000 台光源,2012 年 Cymer 被荷兰半导体设备商 ASML 收购。日本的小松公司在 1985 年制造了日本第一台准分

子激光器 KLE-630, 1996 年小松公司建立了它的准分子激光器业务部并在日本建立了准分子激光器工厂, 并成立了 Gigaphoton 公司。目前 Cymer 公司占据了光刻机光源 80% 以上的市场, 在浸没式及以上的高端光源领域更是占据 90% 以上的市场。

3 光刻用准分子激光器现状

3.1 工作原理及主要机型

光刻是集成电路制造中非常重要的一环。硅片经过涂胶、光刻曝光、显影后, 进入下一步的刻蚀, 如图 2(a) 所示^[7]。曝光的好坏直接决定了后续的刻蚀精准度。光刻机的曝光基本原理如图 2(b) 所示, 准分子激光光源进入光刻机后先是通过整形光路整形成均匀、符合要求的照明模式, 然后通过聚光透镜到达掩模版。掩模版上是待曝光的集成电路图, 光经过掩膜后经物镜将集成电路图成像在光刻胶上。

目前光刻领域的主流准分子激光光源是 193 nm ArF 激光器和 248 nm KrF 激光器。157 nm F₂ 光源由于光刻胶替代成本较高、镜头材料等原因并没有成为主流。图 3 展示了近三十年光刻用的准分子波长的发展趋势, 随着波长的减小, 光刻分辨率得到提高。

KrF 是第一代用于光刻的准分子光源, 这源于其在输出能量、波长、线宽、稳定性等多个方面都大

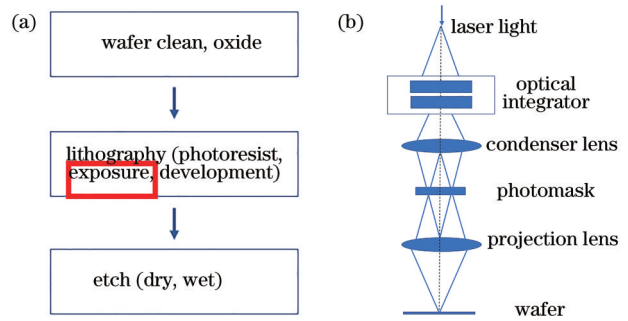


图 2 光刻机在集成电路工艺中的位置和光刻机的原理图。
(a) 位置; (b) 原理图

Fig. 2 Position of lithography system in integrated circuit technology and schematic diagram of lithography system.
(a) Position; (b) schematic diagram

大超过了前期的汞灯光源。同时随着半导体产业和光刻技术在摩尔定律驱动下的不断进步, 有着更短激光波长辐射的 ArF 光源技术也应运而生, 在 KrF 和 ArF 光源的不断迭代改进下, 光刻节点逐步向前发展^[8]。表 3 展示了 ASML、Nikon、Canon 等公司的部分机型及其光源所对应的参数 (其中 NA 为数值孔径)。

光刻机的主要参数指标有分辨率、数值孔径、套刻误差、产出率等^[9]。光刻机的分辨率表示光刻机能清晰投影最小图像的能力, 跟准分子光源的能力有着直接的关系。根据瑞利判据光刻的分辨率

表 3 ASML、Nikon、Canon 的部分机型及其光源

Table 3 Some models of lithography systems for ASML, Nikon and Canon, and laser sources of these systems

| Company | Model | Exposure type | Resolution /nm | Laser source | NA | Output rate (Wafer /h) | |
|---------|---------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|------|------------------------|-----|
| ASML | NXT1980Di | Double immersion step-and-scan exposure | 38 | 193 nm ArF | 1.35 | 275 | |
| | NXT1950i | | | | | 175 | |
| | XT1450H | Double dry step-and-scan exposure | 110 | 248 nm KrF | 0.93 | 162 | |
| | XT1000K | | | | | 80 | 180 |
| | XT860K | | | | | 110 | 210 |
| | XT400K | 350 | 365 nm high pressure mercury lamp | 0.65 | 220 | | |
| | PAS5500/1150C | Single step-and-scan exposure | 90 | 193 nm ArF | 0.75 | 135 | |
| | PAS5500/850D | NA | 110 | 248 nm KrF | 0.80 | 145 | |
| | PAS5500/450F | NA | 220 | 365 nm high pressure mercury lamp | 0.65 | 150 | |
| Nikon | NSR-S631E | immersion step-and-scan exposure | 38 | 193 nm ArF | 1.35 | 270 | |
| | NSR-S621D | | | | | 200 | |
| | NSR-S322F | step-and-scan exposure | 110 | 248 nm KrF | 0.92 | 230 | |
| | NSR-S210D | | | | | 110 | 176 |
| Canon | FPA-6300ES6a | step-and-scan exposure | 90 | 248 nm KrF | 0.86 | 200 | |

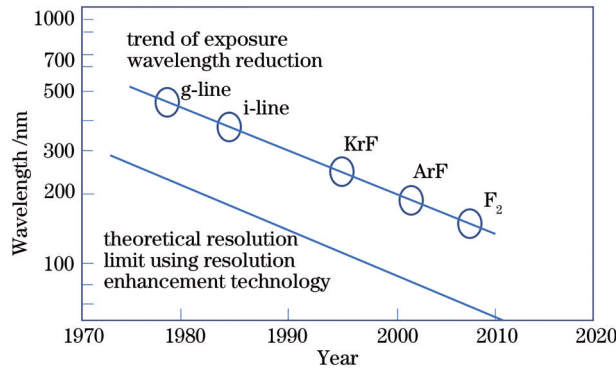


图 3 光刻机光源曝光波长缩短和理论分辨率极限的趋势^[1]
Fig. 3 Trend of exposure wavelength reduction and theoretical resolution limit for laser source of lithography system^[1]

可以表示为

$$R = K_1 \lambda / NA, \quad (11)$$

式中： R 是分辨率； K_1 是工艺系数； λ 是光源的中心波长； NA 是数值孔径。 K_1 与光刻胶工艺、照明相干性和波前的控制都有关系。从光源上提高光刻节点主要是优化光源的波长、能量和光谱宽度及其稳定性。关键尺寸和套刻误差都和光源参数有很大的关系。表 4 展示了光源参数分别从透镜像差、对焦、剂量控制、光学邻近效应和照明等 5 个方面影响曝光关键尺寸。

准分子激光光源的主要指标有重复频率、平均功率、线宽[包括 95% 能量积分(E95)和半峰全宽(FWHM),如图 4 所示]、线宽稳定性、中心波长、中心波长稳定性、剂量精度、单脉冲能量及稳定性、光

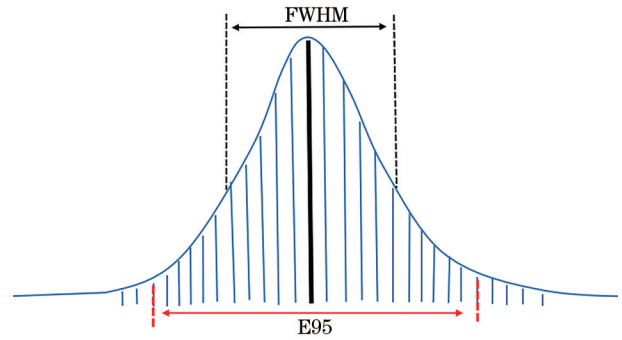


图 4 E95 和 FWHM 示意图

Fig. 4 Diagram of E95 and FWHM

束位置稳定性和光束指向稳定性等。对于光刻准分子激光器的评价有一整套严格的测量、计算和判断标准,该标准必须得到光源和光刻机制造厂商的共同认可。

3.2 单腔准分子激光器原理

单腔准分子激光器主要以 248 nm KrF 激光器为主,也有少部分用 ArF 作光源的单腔准分子激光器^[10-11]。单腔准分子激光器主要模块有放电腔、高压脉冲电源、线宽压窄模块、输出耦合镜、检测模块和控制器,单腔准分子激光器原理如图 5 所示。放电腔通过脉冲电源对电极进行高压脉冲放电进而产生准分子受激辐射,放电腔、输出耦合镜和线宽压窄组成谐振腔对激光进行振荡和放大。线宽压窄模块对激光的光谱进行选择,激光从输出耦合镜输出,检测模块对输出光束进行参数检测后通过控制器进行闭环控制。

表 4 光源参数对光刻机关键指标的影响

Table 4 Influence of laser source parameters on critical dimension of lithography system

| | | Critical dimension | | | |
|-------------|------------------|----------------------|------------------|--------------------------|------------------------|
| Lithography | Lens aberrations | Focus | Dose control | Optical proximity effect | Illumination |
| Lasers | Linewidth | Wavelength stability | Energy stability | Bandwidth stability | Beam stability |
| | Spectral shape | | Beam stability | Beam stability | Degree of polarization |

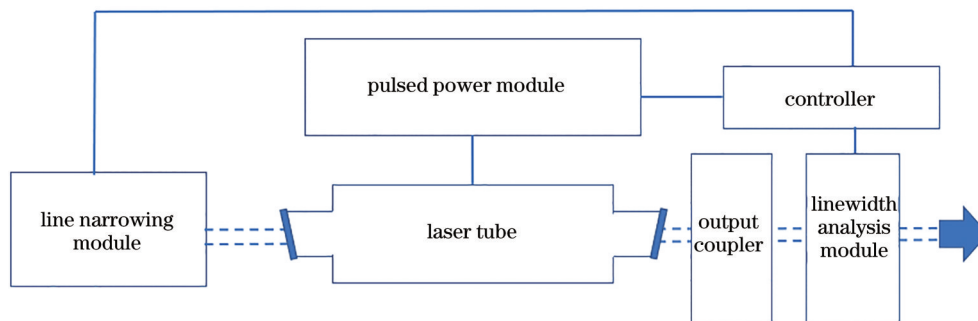


图 5 单腔准分子激光器原理图

Fig. 5 Schematic of single-chamber excimer laser system

高压脉冲电源系统包含高精度谐振充电、脉冲升压、磁脉冲压缩等几个功能单元,实际设计中通过 3~4 个物理模块来实现,最终目标是在放电腔电极两端产生接近 15~30 kV、脉冲宽度几十纳秒、脉冲精度 0.5% 的电脉冲作为准分子激光泵浦能量^[12]。

放电腔分为放电单元(正负电极、预电离装置等)、热管理单元(加热带、水冷回路、风扇等)、光学单元(窗镜、滤网等)和流体单元(风扇、腔型等)。图 6 是放电腔的横截面示意图^[10],高压电脉冲加在正负电极后,预电离装置会先于主放电电极产生放电,此时会产生激光放电所需要的电子密度,从而使激光放电更加均匀;紧接着,正负电极中的电场被高电压击穿开始辉光放电,并产生准分子激光。高频放电需要良好的气体循环去除放电后产生的

余热和放电产物,否则会造成放电质量的下降或者类似拉弧的现象。

线宽压窄是由闪耀光栅和棱镜组组成^[11],采用 Littrow 结构放置。棱镜组通常由 3~4 个扩束棱镜组成,用来减小到达光栅前的发散角,最后从光栅返回的线宽与达到光栅前的发散角成反比,同时棱镜组可以减弱达到光栅前激光的强度密度,提高光栅的使用寿命。

输出耦合镜反射率通常在 20%~40% 之间。检测模块包括能量和光谱检测,用于实时检测系统的性能并反馈给控制器。控制器包含系统控制和光束指标控制两大模块,前者用于放电时序、出光模式和与光刻机通信接口的控制,后者完成对能量、线宽等激光参数的精密控制。

3.3 双腔准分子激光器原理

由于双腔准分子激光器在波长和重频上的优点,在 100 nm 节点以内的光刻主要以双腔准分子激光器为主。相比单腔 248 nm KrF 光源,双腔 193 nm ArF 光源具有更快的曝光速度和更高的分辨率^[13]。

如图 7 所示,双腔准分子激光器主要模块有主放电腔、功率放大腔、高压脉冲电源、线宽压窄模块、输出耦合镜、检测模块、控制器、光路传输模块、脉冲展宽单元等。线宽压窄模块、主放电腔和输出耦合镜组成谐振腔来产生种子光,线宽压窄模块对光谱进行选择;种子光从输出耦合镜后的检测模块(LAM)中输出后通过光路传输模块进入功率放大腔,对种子光进行放大,放大后的激光会再次进入检测模块(BAM)进行检测;为了减弱增益后的激光对光源后续的光刻机照明系统光路的损伤,从

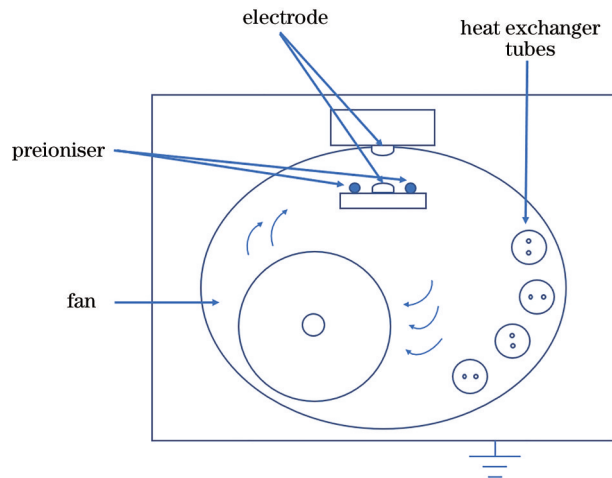


图 6 放电腔的横截面^[10]

Fig. 6 Cross section of discharge chamber^[10]

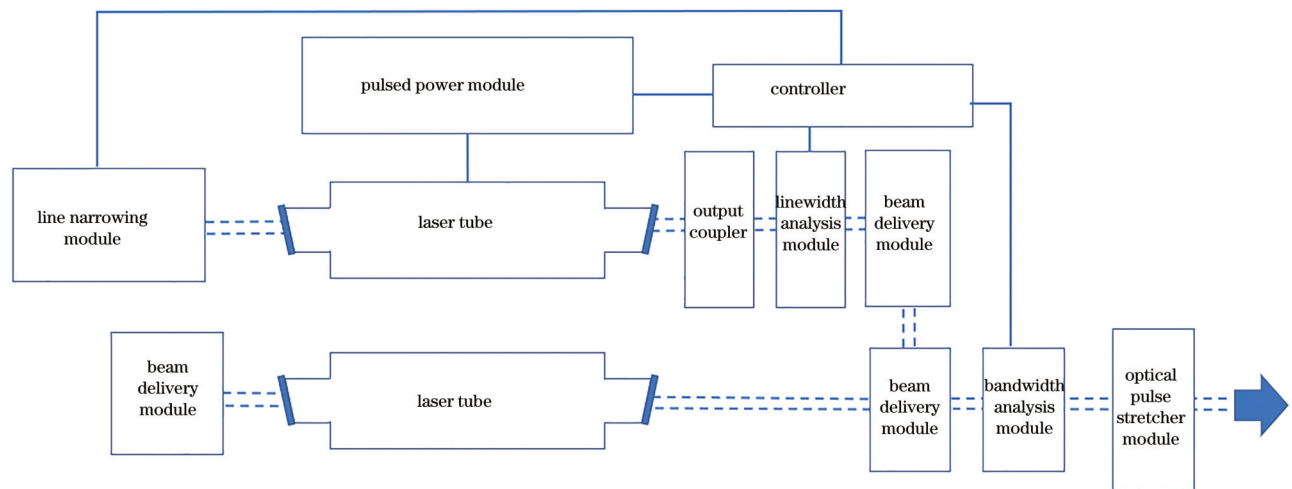


图 7 双腔准分子激光器原理图

Fig. 7 Schematic of dual-chamber excimer laser system

BAM 输出的光会入射到脉冲展宽单元,通过脉冲展宽单元对激光脉宽进行放大来减小激光峰值功率。相比单腔准分子激光器,激光经过功率放大腔获得了更多的增益,会使能量范围更大,对激光器的线宽有更大的调节范围,所以逐渐在 100 nm 以内的光刻节点中占据主流。

主振荡功率放大(MOPA)双腔光路^[13]如图 8 所示,种子光通过 a1、a2 两次反射之后进入功率放大腔,然后在 b1 棱镜中再次反射回功率放大腔。这种结构主放电腔输出的种子光会在功率放大腔中增益两次,单脉冲能量获得增加。

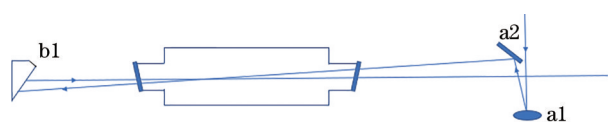


图 8 MOPA 双腔光路

Fig. 8 Light path of MOPA dual-chamber

主振荡功率再生放大(MOPRA)双腔光路如图 9 所示,引入了可多次循环的环形结构^[14],可以在不改变(甚至减小)输入能量和脉冲频率的情况下大幅度提升输出能量。主放电腔的种子光通过高反镜 a1 和高反镜 a2 引入环形腔,部分反射镜 b1、高反镜 a3 和棱镜 c1 组成环形结构,通过 b1 的光被 a3 反射进功率放大腔,然后被 c1 返射回来,然后再次进入功率放大腔,此时到达 b1 的部分光会透射出去,另外一部分光会继续反射到 a3 重复之前的路径,这样光就会在环形结构中多次反射,光束会比之前的 MOPA 结构中更多地通过功率放大腔,能量也会随之变得更大。此外,环形腔的光谱宽度、光束质量都比 MOPA 结构有较明显的提升。

还有一种为注入锁定双腔结构^[15],光路如图 10

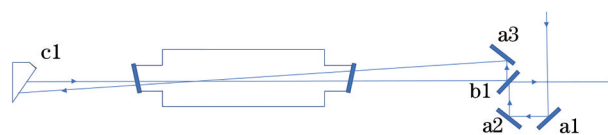


图 9 MOPRA 双腔环形光路

Fig. 9 Ring light path of MOPRA dual-chamber

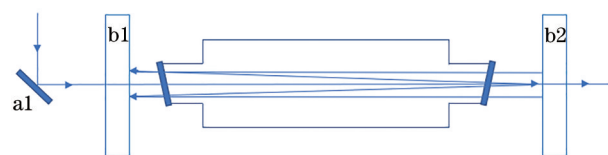


图 10 注入锁定结构的光路

Fig. 10 Light path of injection lock structure

所示,在功率放大腔两端分别有一个 b1 凹透镜和 b2 凸透镜,主放电腔输出的种子光进入由 b1、b2 和功率放大腔组成的谐振腔后会再次产生谐振,种子光会在功率放大腔振荡多次,能量也多次得到放大。与 MOPA 光路相比,注入锁定双腔结构对放电有更高的效率、更好的线宽、更长的脉宽以及更好的能量稳定性。

4 光刻光源关键技术

光刻机被誉为精密工业设备“皇冠上的明珠”,从整机到各核心子系统、模块、元器件,涉及到的技术领域繁多、指标体系复杂、指标要求极端苛刻,且对稳定性、可重复性、可靠性的要求极高,所涉及的产业链深度和广度复杂,几乎在每一个领域都在挑战现代大工业精密制造技术的极限。光刻准分子激光技术涉及高频高压脉冲功率系统、气动放电腔设计、深紫外光学设计、紫外/深紫外精密检测、复杂系统控制理论与设计、精密光学机械设计、高纯度高刚度金属合金材料的加工制造、高纯度陶瓷材料的加工制造等多学科交叉领域。实际设计过程中,需要根据光刻机需求,从系统工程的角度分解各个模块/子系统,分析各模块、各参数的耦合特性,设计时则需要自下而上解耦合,其过程较为复杂,很难在一篇短文中从系统论的角度去阐述关键技术。因此,本文仅仅列举准分子光刻光源的核心系统指标所涉及的部分关键技术。

4.1 中心波长和线宽

中心波长稳定性、线宽及稳定性都与光刻机数值孔径直接相关。在干式和浸没式光刻工艺中,中心波长、线宽及其稳定性会影响到光刻分辨率和景深,波长稳定性会影响到光刻图形的关键尺寸^[1],因此提升光源的中心波长和线宽指标是很重要的工作,典型光刻工艺节点与光源所需中心波长、线宽指标的对应关系如表 5 所示。

放电腔产生的光束进入线宽压窄模块中,线宽压窄模块中的闪耀光栅会对特定波长的光束产生反射,光栅公式如下:

$$2dn_t \sin \alpha = m\lambda, \quad (12)$$

式中: d 是光栅周期; λ 是中心波长; n_t 是光栅前气体的折射率; α 是光栅入射角度; m 是衍射级数。

波长和线宽除了受到光束入射角度、光束发散角等因素的影响外,主要扰动因素还包括线宽压窄模块中的光学元件材料、内部气浴流场、放电腔内

表 5 典型工艺节点与线宽、中心波长稳定性的对应关系

Table 5 Relationship of process node with linewidth and center wavelength stability

| Process node /nm | Type | Linewidth (FWHM) / μm | Center wavelength stability / μm |
|------------------|--|----------------------------------|---|
| 180-110 | KrF single-chamber | $\leq 0.35-0.60$ | ≤ 0.050 |
| 90-65 | ArF dual-chamber, dry | ≤ 0.25 | ≤ 0.030 |
| 45-28 | ArF dual-chamber, immersion | ≤ 0.25 | ≤ 0.030 |
| 14 | ArF dual-chamber, immersion, multiple exposure | ≤ 0.25 | ≤ 0.018 |
| 7 | ArF dual-chamber, immersion, multiple exposure | ≤ 0.25 | ≤ 0.012 |

部热量扰动和光源整体系统振动。光栅前空气折射率会受到线宽压窄模块内温度的影响,当线宽压窄模块的温度无法稳定时,光栅前空气折射率会因为气浴流场不均匀而发生变化,会影响光束波前,中心波长、线宽及其稳定性都会受到影响。气浴气体折射率也会影响到中心波长和线宽,公式如下:

$$n_g = 1 + KT/300, \quad (13)$$

式中: n_g 是气浴气体折射率; T 是温度; K 是比例系数,式(13)反映了气体折射率与温度及比例系数的关系。氮气的 K 值是氦气的8倍,所以氦气在热量不均匀时的影响远远小于氮气,但氦气使用成本较高。由于气体流场对热量不均匀性的影响很大,因此合理设计散热结构,减弱高频激光产生的热量,合理的散热结构对线宽压窄模块热量比较高的地方进行了处理,保障了光栅入射角的一致性,使得通过光栅后可以保证很好的线宽^[16]。

波长、线宽也与放电有关。比如每个剂量最初有一部分脉冲能量不稳定的现象与放电区域气体热扰动有关^[17],这样也会影响到波长、线宽等光学参数;谐振腔内的热量不均匀也会引起腔内气流的折射率发生变化,从而引起最后的中心波长和线宽的变化,所以腔体的热量扰动也对波长和线宽有一定的影响^[18]。

波长稳定性和线宽稳定性对于入射光束发散角稳定性、光学元件以及机械支撑结构的稳定性都有很高的要求^[19]。激光系统中振动是不可避免的,有很多很难控制的运动,也有很多必须运动的部件,其振动会影响到波长和线宽的稳定性,所以需要一些设计控制这些运动带来的振动,比如使用磁悬浮轴承^[20]。

目前主要通过主动控制方法提升中心波长和线宽指标^[21],该方法是通过测量模块实时测量激光束的线宽和中心波长,然后将信号反馈给线宽压窄模块的闭环反馈系统。闭环反馈系统电机反应时间小于0.1 ms,对光学元件进行调节,并通过之前

的结果建立模型去预测下一步的移动,进一步加快反馈速度^[22]。此外,还可以用压电陶瓷驱动器(PZT)进行处理^[19],PZT对波长错误的反应频率可以达到1 kHz。更快速的主动控制则可以通过控制双腔同步延迟来实现,但这会影响光源系统的能量和剂量稳定性,因此需要涉及更复杂的算法来解耦线宽控制对能量和剂量稳定性的影响。可以设计控制器去预测内部的光源干扰以及外部的波长闭环反馈系统的物理状况,结合高级自适应和学习技术,运用前馈与反馈算法共同稳定光学参数,最终用这种控制可以实现提高线宽稳定性和波长稳定性的同时,不影响能量和剂量稳定性^[23]。从长期稳定性来说,可以通过时间、电压、氟气含量等系统参数的分析来校准线宽。

线宽的测量方法也会影响测量结果的准确性。光斑的不均匀可能会导致线宽的测量不够准确,光谱测量光路中会使用匀光片使光斑匀化^[24],这样光谱测量不会因为对应光斑的位置原因而受到影响。另外,测量仪器的准确性也对线宽测量有着影响,仪器函数的傅里叶变换出来的结果需要小于待测的线宽值,且仪器函数需要被准确地测量。

4.2 能量及剂量稳定性

脉冲能量稳定性的优劣会影响到剂量稳定性,剂量稳定性的提高能够减小光刻误差。对于集成电路光刻来说,能量变化的概念,也即“energy sigma”是非常重要的。energy sigma是一段脉冲的脉冲能量平均值的标准差,正常情况下要在3%~4%以内,理想情况可能会更低。脉冲能量的控制首先取决于对放电电压的精准控制,单脉冲电压精度需要控制在0.5%以内。其次,要使用复杂的能量控制算法来控制“energy sigma”或者剂量的稳定性。通常,光刻准分子光源系统使用多重嵌套能量控制来实现最终的能量或剂量控制目标。最基本的控制回路主要是运用比例积分微分控制器(PID)

或改进 PID 算法,使用前 N 个历史脉冲的能量和电压来预测下一个脉冲的能量和电压,更先进的算法会通过自适应策略去优化算法,使得算法能够较准确地计算和预测变化电压和变化能量的比值,以及每一个电压需要精准的同步延迟。双腔同步延迟控制的要求也非常高,对于重复频率为 6 kHz 的光源系统,双腔同步延迟的控制精度需要在 ± 5 ns 以内,很多时候控制在 ± 2 ns 以内^[25]。而且同步延迟并非一个固定值,同样需要根据激光器的历史和实时状态,估算最佳的同步值并在一个脉冲的时间内调节到最佳同步延迟。同时,能量/剂量控制算法还会加入前馈回路,来修正首脉冲问题,以及不同重频、不同占空比下的首脉冲问题;通过加入滤波算法,修正振动引发的能量不稳定问题。对于长期能量稳定性,还需要补气策略算法来加以配合^[26]。

能量稳定性欠佳的原因有很多,其中一个现象就是首脉冲能量超调,即一个剂量中前几个脉冲能量远远高于(有些情况下也会低于)后面脉冲能量的现象。首脉冲超调的原因很多,与气体配比、气体杂质含量都有关系。其中,氙气含量异常会导致首脉冲的问题,氙气含量异常会引发单脉冲能量随机跌落,一般情况下氙气的质量分数为 10^{-6} 时能量输出较好^[27]。

能量掉点也是能量稳定性不好的一个表现。能量掉点是指一个脉冲串里突然有脉冲的能量比其他脉冲能量低很多的现象,很难用剂量稳定性的算法去规避,这种现象被称为低能量脉冲现象(low energy event)^[28],即使在清扫率比较高的时候,低能量的脉冲也是有可能发生的。需要重新设计气体流动路径和电极结构去改进气体流速,尤其是去提高电极表面的吹扫速度。此外,这种能量掉点会在腔的除尘装置中慢慢失效后变多,为了应对这一情况并提高腔的使用寿命,也可以通过除尘装置优化设计进行提升^[29]。

能量扰动是另一个影响腔中气体密度和电子密度的问题。能量扰动可能与腔体和光学元件的振动有关,比如从风扇返回的激波可能会造成能量扰动,需要重新设计风扇去减少这种扰动,激波是引起能量扰动和剂量稳定性下降的重要原因。同时对双腔放电延迟控制的精度也会影响到能量扰动,时间、电压、温度的控制对放电延迟的影响和能量扰动都有着很重要的作用。

4.3 放电一致性

保证放电一致性是放电腔设计的基本要求,也是整个准分子光源稳定工作的基础。实际工作中,氟气消耗、放电区域残气、激波及腔体放电产生的杂质等都会影响放电一致性^[30]。

氟气消耗会导致气体反应不充分,导致放电一致性受到影响^[31]。通过增加电压会改变气体的效率,改善放电。当电压已经无法提升时,就会通过补气和换气来改进氟气耗尽的情况。放电腔中的杂质会影响放电一致性,放电腔中杂质有两个大的来源:一是放电腔组件的释气(outgass),尤其是有有机物杂质,对放电效率、放电稳定性和均匀性、电-光效率都会有很大影响,因此放电腔内部组件的清洁度要求非常高;二是放电过程中电极溅射和化学反应产生的金属尘埃、原子和带电离子,尤其在高频放电时放电时间间隔变小,放电后的产物如金属尘埃和带电离子难以移除,容易引起放电的不稳定,并且会降低能量稳定性和放电效率。

除了放电腔中固有的杂质,每次放电后产生的带电离子、金属颗粒等会使放电区处于一个低阻抗状态,需要及时清扫出放电区,从而不影响下一个脉冲放电^[1]。所以为了每次放电后腔内的杂质影响最小,获得更加一致的放电,需要提高腔内清扫率,这就需要提高风机的转速、减小放电区域等手段。放电区清扫示意图如图 11 所示。图中 W 为放电区域的宽度, S 为放电后杂质被清扫移动的区域, V 为风速,清扫率是 S 与 W 的比值。

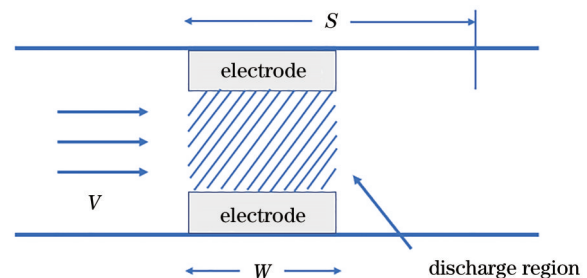


图 11 放电区清扫示意图^[1]

Fig. 11 Schematic of clearance in discharge region^[1]

放电腔中的激波是影响放电的重要因素。当能量快速注入到放电腔中,会造成温度急速上升导致气体介质的波动,当这种波动在放电腔中两个界面间形成共振时就产生了激波,激波会导致放电腔中气体密度扰动并影响放电的稳定性和放电的质量,对远场的光束质量也会有影响,比如影响光束

发散角^[1]、波前扭曲、线宽等。一般来说有两种方法^[32]来减弱激波的影响:一是在放电腔内安装激波吸收片;二是在放电区域附近移除会反射激波的结构^[33]。

4.4 放电腔杂质控制

高频放电时放电腔很容易产生各种杂质,主要为气体杂质和固体杂质。腔中的杂质会极大影响到腔的放电均匀性及放电效率,从而影响光源各项指标参数。

放电腔中绝缘体的使用会极大地减少金属尘埃,但如果绝缘材料选择不当,碳氢化合物、Si、S等杂质有很大可能会被绝缘材料引入腔中,这些杂质会通过光子吸收、沉积膜层来减小能量、加速电极的损耗并减少气体寿命,纯陶瓷和高纯度金属对电极来说是比较好的材料^[34]。

对于气体杂质检测,可以使用质谱仪和红外光谱仪,通过测量各种气体的成分及含量,分析杂质对激光输出的影响^[35]。主要有两种方法:一是分别把质谱仪和红外光谱仪连接在放电腔外部;二是把傅里叶红外光谱仪(FTIR)装在放电腔内部来检测气体杂质含量^[36]。

对于放电腔的杂质控制一般使用静电除尘装置俘获金属氟化物,利用在静电除尘装置入口和出口的气压差驱动气体流经高压静电区域,从而移除大多数的固体放电产物^[37]。同时为了减小窗口片

处的金属杂质,一般会在窗片附近做特殊的流场设计。

4.5 气体寿命

气体寿命对光学参数的稳定性和激光器成本都有直接的影响。随着腔内反应的进行,氟原子会逐渐耗尽,污染物逐渐增加,导致氟原子的减少和放电效率的降低。同时,随着反应进行,氟气会与放电腔内壁及其他腔内物质反应成氟化物,能量和稳定性都会随着氟气的耗尽逐渐下降^[38]。初始阶段可以通过增加电压来提高能量和缓解能量稳定性的下降^[31],当电压提高达到一定的数值时就需要通过补气来增加气体寿命,主要通过控制算法实现微量的气体注入实现补气。补气可以减少因换气导致的机台停止放电时间,以及恢复成换气前的光学参数状态所需要的时间。

有几种策略可以用于检测和计算放电腔中氟气浓度的消耗,从而定时注入适量的工作气体,达到延长气体寿命的目的。比如可以观察能量的变化或者氟气的浓度来判断氟气的量,通过氟气反馈系统^[37],其中检测系统会实时反馈至氟气流量控制系统,对腔内的气体进行补给和排气;在更复杂的算法里,还可以在注气时,观察光谱的变化,根据算法每次注气保持在2%以内^[39]。气体寿命控制系统就是在气体算法基础上发明的^[40],具体原理如图12所示。

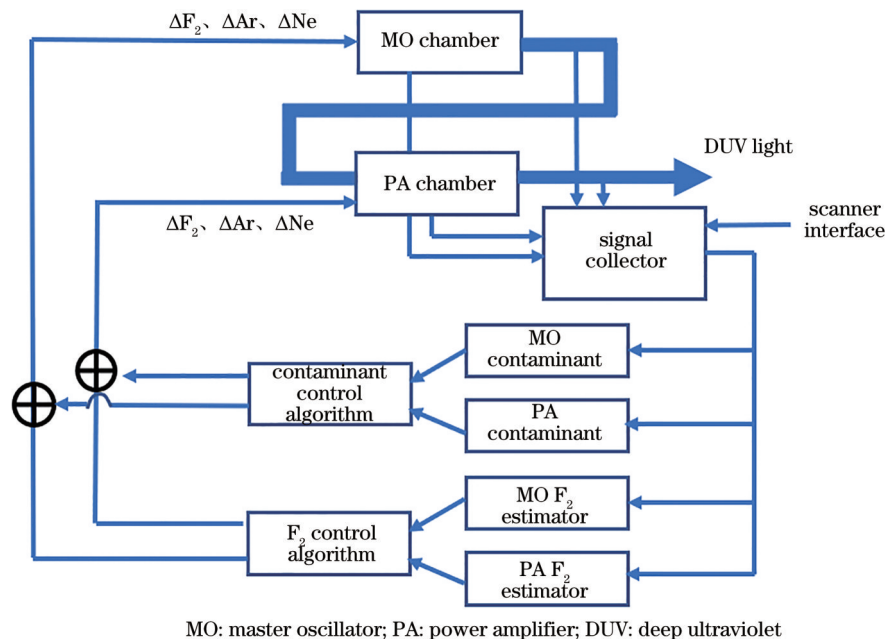


图 12 气体寿命控制系统基本原理图^[40]

Fig. 12 Basic schematic of gas lifetime controller system^[40]

4.6 光学元件损伤

光学元件损伤与激光器可靠性有直接关系,决定了激光器的寿命和运行成本。主要易损元件是线宽压窄模块中的光栅、棱镜,放电腔的布窗镜,以及光路传输模块中的反射镜和棱镜。窗镜、反射镜和棱镜主要是氟化钙材料,氟化钙在紫外到红外(180 nm~8.0 μm)的波长范围内透过率高,机械和环境稳定性高,非常适合作为准分子激光器的光学元件,也几乎是唯一可用的光刻准分子激光器的光学元件材料。

在高温和水蒸气下,氟化钙表面会被氧化,从而影响性能,所以良好的密封和氮气吹扫是必须的^[41]。突然高频出光或者高频突然停止出光可能会对窗镜带来损伤^[42]。对镜片出光相当于对镜片升温,对镜片出光停止相当于对镜片降温,通过实验比较发现慢慢升温 and 突然升温以及慢慢降温和突然降温对镜片的损害是不同的。

通过镀膜可以提高氟化钙的寿命同时保证光学性能不变,首先,镀掺杂了氟离子的二氧化硅会使氟化钙的寿命提高 1000 倍,但透射率会降到 90% 左右,通过再镀一层增透膜会再提高透射率到 99% 以上^[43]。氟化钙的纯度对于氟化钙的寿命也起着重要的作用^[44],由于双光子的吸收会导致色心的形成,所以提高氟化钙的纯度对吸收率的改善会有很大帮助,同时尽力避免因外部热量、机械应力及本身材料特性导致的双折射现象。

4.7 电源模块性能提升

电源模块需要更高的可靠性、更长的寿命、更好的热量管理、更低的成本和更高的效率。通过提高谐振充电输出功率、改善电源模块热结构设计,可提升电源模块工作效率;通过算法提高充电精度,可保证在高重频高功率工作条件下实现高效能精准谐振充电;通过磁开关伏秒级设计,储能电容参数优化以及脉冲压缩的磁芯、匝数、散热和复位电路设计,可提升电源模块单脉冲输出能量,满足高功率放电需求。

电源模块中固体脉冲单元最关键的是绝缘栅双极晶体管(IGBT)开关。相比电子闸流管(thyratron)开关,IGBT 开关有着更长的工作寿命和更高的开关效率^[12]。同步控制的严格要求对 IGBT 驱动提出了很高要求,激光脉冲频率为 6 kHz 时,IGBT 开关的频率远超 6 kHz,抖动控制在 0.58 ns 以内,漂移在 1.28 ns 以内^[12, 45]。

磁脉冲压缩电路用于将几微秒的脉冲压缩到几十纳秒。磁脉冲压缩电路的效率越低,则需要的压缩级数越多,整个系统损耗就越大,导致整机的电光效率、可靠性和可维护性降低。通过全密封结构、微通道、高水阻点位分离设计等手段,可以将磁脉冲压缩效率提高到 98%,从而提高脉冲压缩效率。

电源模块是同步延迟控制最重要的模块。通过调整固体脉冲电源模块电压和温度变化带来的时间延迟,MOPA 的主放电腔和功率放大腔的放电时间同步延迟误差可以保持在 ±2 ns^[25]。电源模块中的温度也对延迟有着影响,磁芯上的温度越高,触发和脉冲的延迟越短,所以电源模块的温度需要被精确控制和检测。

击穿电压决定了脉冲能量注入效率,可以通过对磁脉冲压缩电路的优化进行提高^[28]。充沛的高电压放电能够避免放电不一致的发生。

激光器需要更好的结构获得更高的效率并降低运行成本。预电离的优化使电场更集中并增加由阶梯电极产生的紫外光的利用率,能够提供更高的放电强度和放电一致性,因此在输出能量不变的情况下降低总输入功率^[46]。

4.8 光束质量提升及测试

光束质量也影响着光刻的结果^[47],需要通过一些方法提升光束质量,并且进行准确测试。

放电腔中的散热和放电不一致都会造成光束质量的扰动。改进激光器的设计,包括放电腔的结构、散热方式、光路等都会对光束质量有所改善,也可以通过其他方法主动去改善,通过光学元件来主动抑制激光器中光束的抖动^[18],包括发散角、光束指向稳定性等。激光器输出光束中的散斑与相干性相关,是激光器中各个光学元件干涉的结果,由光源在时间和空间的相干性所导致,减小光束散斑可以提高光束质量^[47]。

光斑尺寸大小是判断光束质量非常重要的参数,光束传播可以用图 13 和下式^[48-50]来描述:

$$W_x^2(Z) = W_{0x}^2 + \left(\frac{M^2 \lambda}{\pi W_{0x}} \right)^2 (Z - Z_{0x})^2, \quad (14)$$

$$M^2 = \theta \frac{\pi W_{0x}}{\lambda}, \quad (15)$$

式中: $W_x(Z)$ 是光束的半径; W_{0x} 是初始光束半径; Z 是传播的轴; $Z - Z_{0x}$ 是传播的距离; M^2 是光束质量因子并与光束类型相关,如果是高斯基模, $M^2 =$

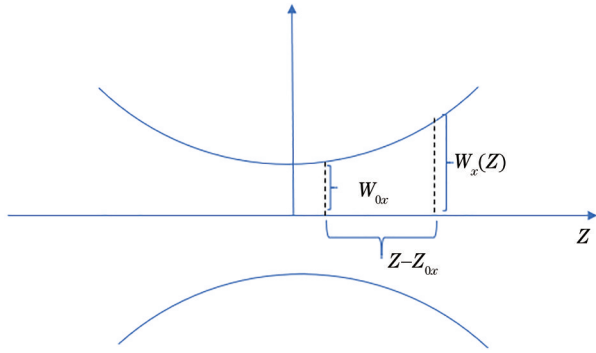


图 13 光束传播示意图

Fig. 13 Diagram of light propagation

1; λ 是波长; θ 是发散角。

同时光束直径 d_x 可以用下式来表示:

$$d_x = 2W_x = 4\sigma_x, \quad (16)$$

$$\sigma_x^2 = \iint x^2 I(x, y) dx dy, \quad (17)$$

式中: d_x 是 x 方向的光斑尺寸; W_x 是光束半径; σ_x 是

光束能量分布标准差; $I(x, y)$ 是光束强度。

相比高斯基模的光斑尺寸求解方法, 对于准分子激光比较精准的测试方法是刀口法。对于刀口法, 首先要用两个刀口比例去切光斑, 用这两个刀口间的距离和光斑相对的尺寸因子求解光斑尺寸。对于准分子激光, 由于光斑更均匀, 所以准分子激光的光斑并不是传统意义上的高斯基模光斑, 而是接近“top hat”型的光斑^[48], 高斯基模光斑如图 14(a) 所示, “top hat”型光斑如图 14(b) 所示, 刀口比例和 D_c/σ_x 对于各多模高斯模式如图 14(c) 所示^[48], 图 14(c) 中, 高斯光束模式 (n) 为基模 ($n=0$) 时的曲线与“top hat”型光斑的曲线在刀口比例 5% 处相交, 由于光斑尺寸通过高斯基模的尺寸因子去计算, 所以刀口取值用 95% 和 5% 时, 用此刀口加上这个比例下的高斯基模的尺寸因子就可以求解“top hat”型光斑尺寸。

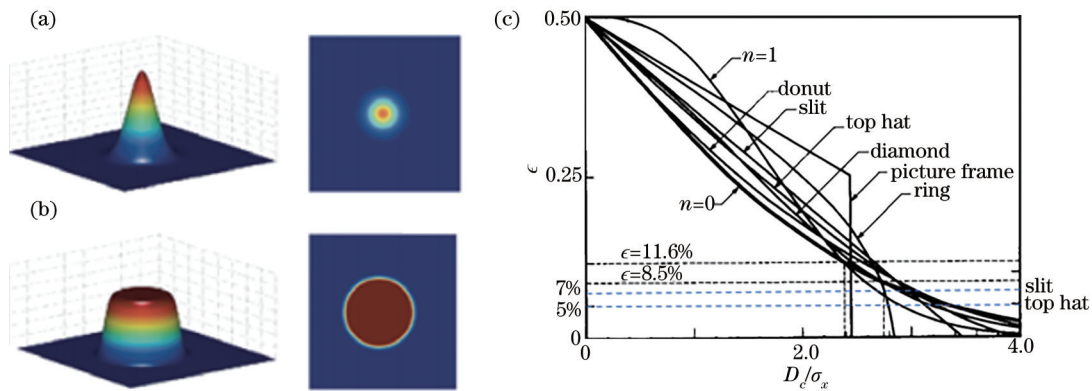


图 14 高斯模式和准分子激光模式的强度分布及其刀口曲线。(a) 高斯基模光束^[48]; (b) 准分子激光光束^[48]; (c) 多个高斯模式刀口比例 ϵ 和 D_c/σ_x 对应的图^[49]

Fig. 14 Intensity distributions of Gaussian mode and excimer mode and their curves of knife edge. (a) Beam of Gaussian fundamental mode^[48]; (b) beam of excimer laser^[48]; (c) relationship between knife edge ratio ϵ and D_c/σ_x for several Gaussian modes^[49]

对于 x 方向, D_c/σ_x 对应的是比例因子 S , 如图 14(c) 中所示, D_c 是两个比例的刀口间距离, 所以可以得到

$$\sigma_x = \frac{D_c}{S}, \quad (18)$$

光斑尺寸可以根据式 (16) 和式 (18) 确定如下:

$$d_x = 4/S \times D_c. \quad (19)$$

从图 14(c) 中看出高斯基模 5% 对应的比例因子 S 大概在 3.300 左右, 同时经过理论推导, 可以算出精确的高斯基模在 5% 刀口对应的 S 为 3.287, $4/S$ 为 1.217, 所以 1.217 就是 95/5 光斑尺寸的计算系数^[51], y 方向光斑尺寸计算方法类似。

对于远场光斑, 由于光斑强度分布方式接近高斯基模, 所以对刀口比例没有具体要求, 所以此时应该用 ISO 标准的 90/10 刀口法去计算远场光斑。光束位置稳定性和光束质量稳定性, 则可以通过位置传感器进行测量^[52]。

5 未来发展趋势

在国家战略科技力量体系化布局下, 我国光刻准分子激光技术取得了显著进展, 攻克了一系列高性能准分子激光核心技术。随着科技的发展, 所需要的光刻工艺节点在逐渐变小, 这使得光刻设备的制造难度逐渐增大。光刻机光源未来主要有

两种趋势:一是降低激光器成本、提高效率;二是优化现有激光器,同时继续提高光学精度,优化节点指标^[53]。如图 15 所示,5 个方框代表了激光器各模块的技术进步,分别可归纳为对生产率的提高、耐

久性的提高和精度的提高;低的功耗带来了更低的成本,提高了生产率;先进的材料使激光器的耐久性进一步增强;更好的光学元件、设计结构和控制算法进一步提高了光学性能。

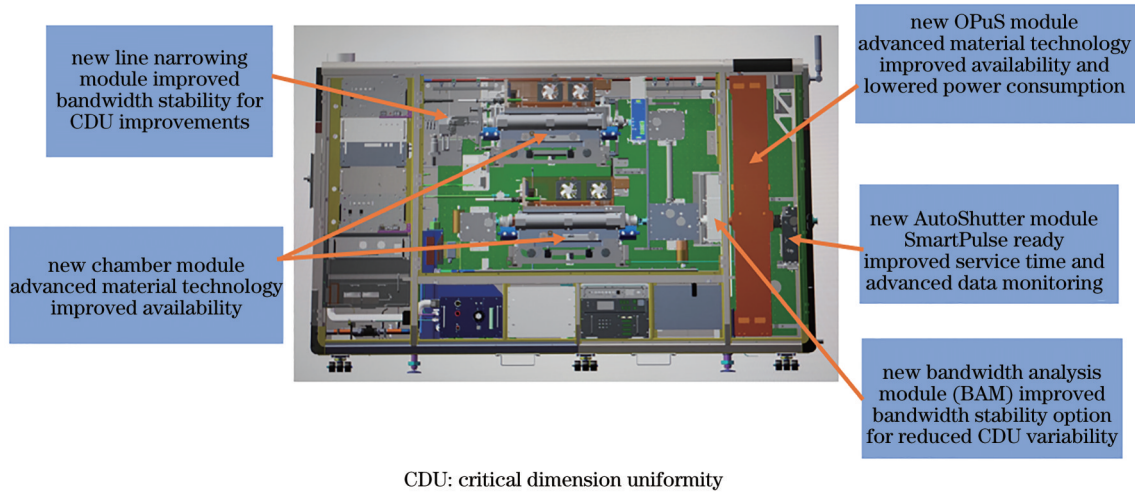


图 15 新的准分子激光光源各方面性能得到提升,包括生产率、耐久性和光学性能

Fig. 15 Recent excimer laser source is improved in many aspects, including production ratio, durability and optical performance

5.1 成本和生产率

7 nm 以下光刻工艺节点的进步虽然可以提升性能,但成本会更高,所以未来将向着更低成本、更长寿命和更低能耗的方向发展。

5.1.1 气体供应

表 6 是 Cymer 公司和 Gigaphoton 公司近年来对氦气和氖气方面的优化。由于气体供应的原因,同时也为了节省成本,激光器在气体使用上进行了更多的研发改进^[54]。

由于氖气和氦气使用成本较高,通过新的设计可大幅度减少氖气消耗。这种气体循环系统开始在 Gigaphoton 公司的 GT65A 型光源上使用^[54], hTGM 的原理如图 16 所示,用过的气体会通过过滤等装置转移到 B 罐,并通过质量流量计 A。如果

气流不够,再通过气罐通过质量流量计 B 直接提供气体。所有的数据类似气压、温度和气量都被实时监控、计算和存储。在氦气方面, Gigaphoton 公司还设计了新的线宽压窄模块结构去节省氦气的使用^[55],这个设计利用氮气进行吹扫,由于氮气受温度影响较大,重新设计了新的结构使线宽压窄模块的散热更好,同时保持光学性能指标不变,最终使线宽压窄模块中的氦气可以完全被氮气代替。Cymer 公司同时也开发和验证了氖气循环系统^[56], XLGR 氖气循环系统的主要原理如图 17 所示,图中 tri-mix 是 3 种气体混合, bi-mix 是 2 种气体混合, XL 是激光器系统型号。废气通过纯化压缩之后作为两种混合气再次进入激光器,减少了氖气的消耗。

表 6 Cymer 和 Gigaphoton 近几年在气体减少和循环方面工作的对比

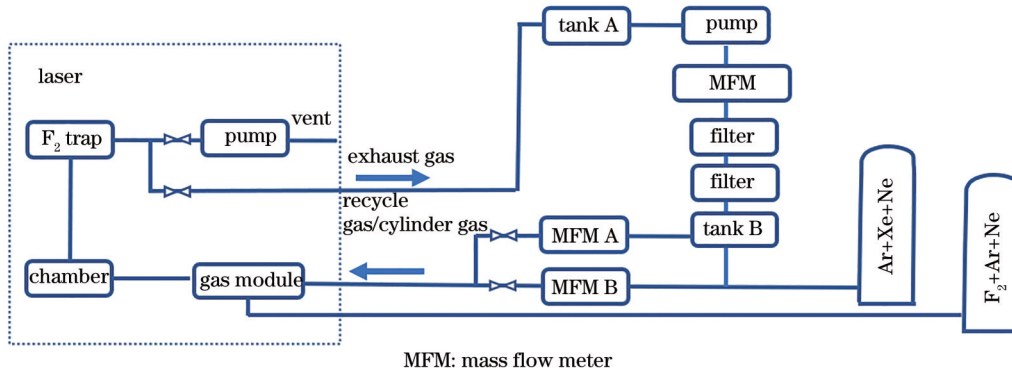
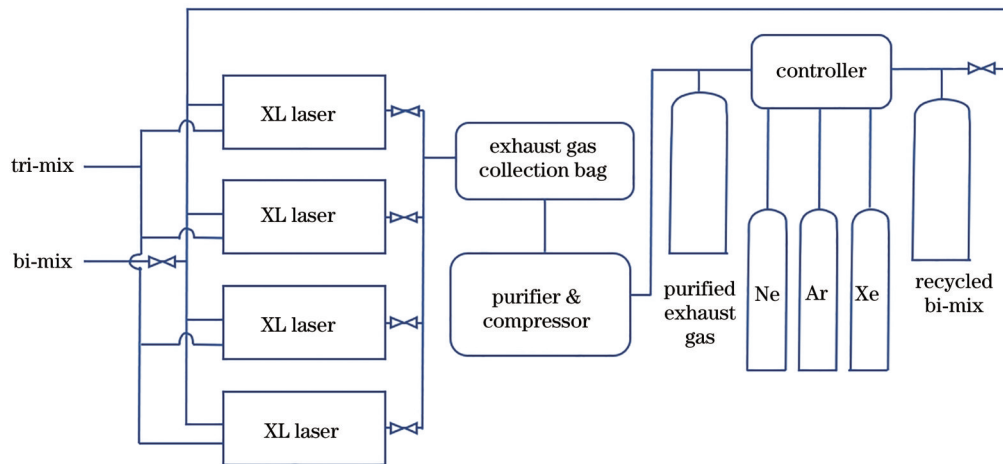
Table 6 Comparison of gas reduction and recycling between Cymer and Gigaphoton in recent years

| Year | Cymer | Gigaphoton |
|------|--|---|
| 2015 | With GLX system and Neon reduction | Helium is replaced by Nitrogen for GT64A, and it saves 80 kL Nitrogen |
| 2016 | system, 75% of Neon usage is saved for | per year; For GT63A, with help of eTGM Neon reduction system, |
| 2017 | XLR700ix | usage of Neon is reduced from 200 kL per year to 100 kL per year |
| 2018 | On basis of Neon reduction system, 90% | On basis of eTGM, 92% Neon is recycled by hTGM Neon recycling |
| 2019 | Neon is saved by XLGR Neon recycling system for XLR800ix | system for GT65A |

5.1.2 电力

在电力方面,可以优化系统放电效率、电力利

用率、放电以外的功耗(比如风扇、加热棒等)等方面。通过环形光路结构提升输出能量,提高光束输

图 16 Gigaphoton 的 hTGM 氖气循环系统原理图^[54]Fig. 16 Concept schematic of Gigaphoton hTGM Neon recycling system^[54]图 17 Cymer 的 XLGR 氖气循环系统原理图^[56]Fig. 17 Concept schematic of Cymer XLGR Neon recycling system^[56]

出功率^[14], 双腔 MOPRA 结构达到了类似的效果^[15]。通过对主放电腔电极优化, 改变了电极材料和形状使腔内的放电更加一致, 使放电腔在用了较长时间之后也能保持比较稳定的放电注入能量^[57]。

5.1.3 提高寿命

提高激光器使用寿命也是未来的趋势。在光学材料方面的技术突破可以使激光器中光学元件的寿命得到提高, 比如对膜层的优化可以极大减缓紫外光的辐射损伤, 使得线宽压窄等模块的寿命大幅度提升。对放电电极的优化不仅可以提升放电腔的使用寿命也可以促进气体寿命的提升。通过电极结构和材料优化, 能够在运行较长时间后依然保持稳定放电, 放电腔的寿命主要由放电腔的能量稳定性开始恶化的时间点决定。表 7 是 Cymer 和 Gigaphoton 公司最近几年在激光器寿命上的发展^[15]。

5.1.4 减少碳排放

除了改善使用寿命, 降低激光器及各模块的维

护频次也是准分子激光器的一个新的研究趋势^[58]。为了减少碳排放: 一方面是更少的维护次数、更长的维护间隔时间; 另一方面是提升激光器整体的转换效率。通过新型材料和新的结构设计, 激光器性能可以长时间保持稳定, 从而降低维护次数。这样在整个激光器产业链环节消耗的能源会减少很多。

5.2 光刻节点优化

对于光刻准分子激光器, 满足晶体管光刻工艺节点需要, 提升光刻节点对应的指标性能是最根本的研究方向。

相比以往的光刻机数值孔径, 随着节点越来越小, 准分子激光器未来的性能主要从光源参数的稳定性上提升。随着双重曝光以及多重曝光在光刻工艺中的成功应用, 带来了更多对工艺控制上的要求, 包括关键尺寸、套刻误差、边缘放置误差、光刻和图形工具, 需要更多的方法去解决这些误差并保持良好的工艺制程。同时, 光源也需要与后端光刻

表 7 Cymer 和 Gigaphoton 近几年在激光器寿命上的对比
Table 7 Comparison of laser lifetime between Cymer and Gigaphoton in recent years

| Year | Cymer | Gigaphoton |
|--------|---|--|
| 2015 | Maximum lifetime of XLR700ix is 90 billion pulses | Maximum chamber lifetime of GT64A is 40 billion pulses |
| 2016 | | |
| 2017 | | |
| 2018 | Maximum chamber lifetime of XLR800ix is 120 billion pulses | Maximum chamber lifetime of GT64A is 60 billion pulses |
| 2019 | | |
| 2020 | Expected maximum chamber lifetime of XLR900ix is 180 billion pulses | Maximum chamber lifetime of GT66A-1 is 100 billion pulses |
| Future | NA | Maximum chamber lifetime of GT66A-1 is 120 billion pulses and maximum line narrowing module lifetime is 180 billion pulses |

工艺更好地进行结合和调整,通过减小各项光学系数来优化关键尺寸、套刻误差、边缘放置误差。较小的节点需要更好的线宽稳定性和更好的波长稳定性,E95的稳定性和关键尺寸的一致性成正比,想要关键尺寸变小,就需要提高线宽稳定性,如图 18 所示。同时波长稳定性会影响套刻误差、对焦,更多的套刻误差和对焦的优化还需要在光源后续的照明系统和物镜系统中开展验证^[59]。波长和线宽等参数的稳定性不仅直接影响曝光图形的关键尺寸绝对值和关键尺寸一致性,线宽优化在与光学邻近效应修正的配合下,还可以有效减小色差导致的成像模糊,从而得到更好的图像对比度^[60]。同时,在光源光罩协同优化情况下,E95 指标的提高可以改善曝光宽容度、光罩误差增强因素以及关键尺寸的一致性^[61]。

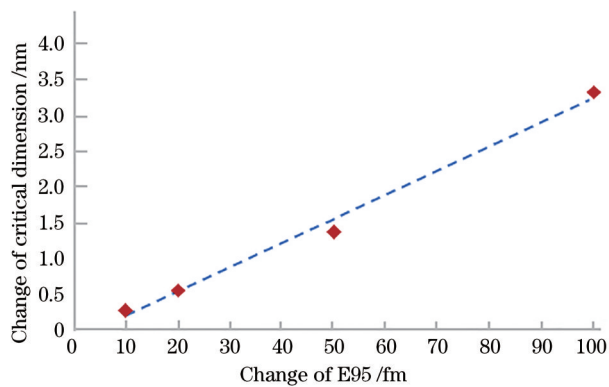


图 18 E95 变化跟关键尺寸变化的关系基本上成线性相关的关系

Fig. 18 Relationship between change of E95 and change of critical dimension is basically linear correlation

线宽和波长依旧是光刻节点向前发展的重要因素,尤其在 32 nm 节点以下,线宽和波长的稳定性比剂量稳定性对光刻结果有着更深的影

响。长稳定性的提升主要通过不断改进线宽压窄模块中光学元件的加持结构,提高系统整体刚度来抑制光学元件的振动;优化线宽压窄模块中转动光学元件的响应速度,以及优化脉冲到脉冲的闭环反馈来调整双腔延迟等多种手段获得更稳定的波长和线宽指标,进而得到更加稳定的曝光图形关键尺寸。

此外,通过改善脉冲展宽单元可以减少散斑,也是未来减小边缘放置误差、提升分辨率的方法^[62],从而降低光刻机曝光图形边缘粗糙度。

5.3 光刻检测应用

5.3.1 光刻过程中的检测

由于低相干性,准分子激光器也可以用于光刻中对样品(主要指硅片)的检测,同时更短的波长也有利于更小结构的检测^[63]。当激光用于光罩检测时,光谱较宽会带来色差,光谱较窄会带来空间相干性^[64],都会影响检测准确性。Coherent 公司的 193 nm 准分子激光器设备 ExciStar S-Industrial,如图 19 所示,激光器的色差和空间相干性尽可能地



图 19 相干公司设计的准分子激光检测设备 ExciStar S-Industrial^[64]

Fig. 19 Excimer laser inspection system ExciStar S-Industrial designed by Coherent Inc^[64]

减小。KLA-Tencor 公司也用准分子激光对光刻样品进行检测,检测包括明场和暗场检测,其中一种测量设备使用光子晶体光纤^[65]用于检测样品的缺陷,光纤结构如图 20 所示。相比以往的检测产品,这种检测设备有更高的亮度,可用于 20 nm 等级水平光罩缺陷检测。

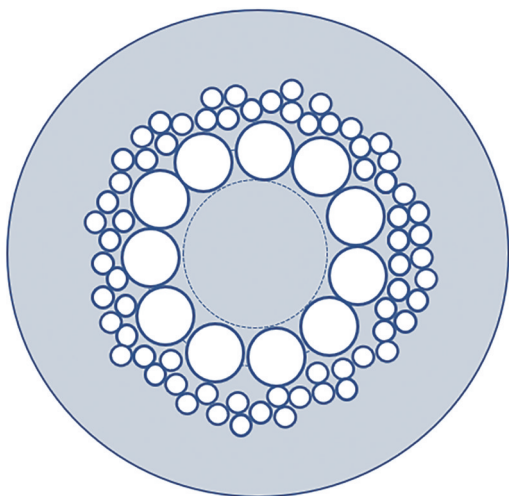


图 20 激光检测设备使用的光纤结构横截面^[65]

Fig. 20 Cross section of fiber structure used in laser inspection system^[65]

5.4 中国光刻光源发展前景

总体来说,虽然我国在光刻准分子激光器研发方面已取得阶段性成果,但由于起步晚、前期投入不足,以及基础材料技术、基础工业技术积累薄弱等因素,我国在光刻准分子激光器领域相较于国外先进一流技术仍有较大差距。近年来,随着西方世界强国对国内光刻机产业链的禁运或限运,给国内光刻准分子激光器乃至整个光刻产业链发展带来契机;同时由于摩尔定律的限制,国外公司在光刻准分子光源技术方面很难有较大的跨越式发展,为国产光刻准分子激光器的发展提供了更多的时间与机会。国内光刻准分子激光和光刻产业正在逐步追赶,随着关键技术研究的突破和相关产业链的成熟,国内光刻准分子激光器公司正在慢慢拉近与国外公司的差距,相信有一天中国的光刻准分子激光器和光刻机将在世界占据自己的一席之地!

参 考 文 献

[1] Basting D, Marowsky G. Excimer Laser Technology [M]. Heidelberg: Springer, 2005.
[2] Basov N G, Danilychev V A, Popov Y M.

Stimulated emission in the vacuum ultraviolet region [J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1971, 1 (1): 18-22.

- [3] Golde M F, Thrush B A. Vacuum UV emission from reactions of metastable inert gas atoms: Chemiluminescence of ArO and ArCl[J]. Chemical Physics Letters, 1974, 29(4): 486-490.
[4] Burnham R, Harris N W, Djeu N. Xenon fluoride laser excitation by transverse electric discharge[J]. Applied Physics Letters, 1976, 28(2): 86-87.
[5] Hoffman J M, Hays A K, Tisone G C. High power UV noble-gas-halide laser[J]. Applied Physics Letters, 1976, 28(9): 538-539.
[6] Jain K, Willson C G, Lin B J. Ultrafast deep UV lithography with excimer lasers[J]. IEEE Electron Device Letters, 1982, 3(3): 53-55.
[7] Rothschild M. Projection optical lithography[J]. Materials Today, 2005, 8(2): 18-24.
[8] Moore G E. Lithography and the future of Moore's law[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2439: 2-17.
[9] Ito T, Okazaki S. Pushing the limits of lithography [J]. Nature, 2000, 406(6799): 1027-1031.
[10] Borisov V M, El'tsov A V, Khristoforov O B. High-power, highly stable KrF laser with a pulse repetition rate[J]. Quantum Electronics, 2015, 45(8): 691.
[11] Sengupta U K. Krypton fluoride excimer laser for advanced microlithography[J]. Optical Engineering, 1993, 32: 2410-2420.
[12] Ness R, Melcher P, Ferguson G, et al. A decade of solid state pulsed power development at Cymer Inc [C]//Conference Record of the Twenty-Sixth International Power Modulator Symposium, 2004 and 2004 High-Voltage Workshop, May 23-26, 2004, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 228-233.
[13] Fleurov V B, Colon D J, Brown D J W, et al. Dual-chamber ultra line-narrowed excimer light source for 193-nm lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5040: 1694-1703.
[14] Brown D J W, O'Keeffe P, Fleurov V B, et al. XLR 500i: recirculating ring ArF light source for immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 652020.
[15] Igarashi M, Miyamoto H, Katou M, et al. Imaging performance enhancement by improvements of spectral performance stability and controllability on the cutting-edge[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11327: 1132717.

- [16] Cybulski R F, Ershov A I, Onkels E D, et al. High power gas discharge laser with line narrowing unit: US6735236[P]. 2004-05-11.
- [17] Sandstrom R L, Besaucele H A, Fomenkov I V, et al. Pulse energy control for excimer laser: US6005879 [P]. 1999-12-21.
- [18] Kleinschmidt J. Narrow band excimer or molecular fluorine laser with improved parameters: US6603789 [P]. 2003-08-05.
- [19] Spangler R L, Jr, Jacques R N, Brown D, et al. Wavelength stabilization in an excimer laser source using piezoelectric active vibration control[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4346: 1190-1201.
- [20] Tanaka S, Tsushima H, Nakaïke T, et al. GT40A: durable 45-W ArF injection-lock laser light source for dry/immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 61542O.
- [21] Dunstan W J, Jacques R, Rafac R J, et al. Active spectral control of DUV light sources for OPE minimization[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 61542J.
- [22] Riggs D J, Haugan O. Advanced laser wavelength control: US8254420[P]. 2012-08-28.
- [23] Will C, Hoang D, David D, et al. Improvements in bandwidth and wavelength control for XLR 660xi systems[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9052: 90521H.
- [24] Suzuki T, Kubo H, Suganuma T, et al. High-resolution multigrating spectrometer for high-quality deep-UV light source production[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4346: 1254-1261.
- [25] Fallon J P, Sandstrom R L, Partlo W N, et al. Control system for a two chamber gas discharge laser: US6690704[P]. 2004-02-10.
- [26] 冯泽斌, 周翊, 江锐, 等. 门控循环网络辨识准分子激光器能量模型[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0901004.
Feng Z B, Zhou Y, Jiang R, et al. Recognition of energy model of excimer laser by gate recurrent unit [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0901004.
- [27] Terashima K, Wakabayashi O, Sumitani A. Ultraviolet laser apparatus and gas for ultraviolet laser: US6496527[P]. 2002-12-17.
- [28] Matsunaga T, Enami T, Kakizaki K, et al. Extremely high-NA high-throughput-scanner-compatible 4-kHz KrF excimer laser for DUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4346: 1617-1626.
- [29] Partlo W N, Amada Y, Carmichael J A, et al. Gas discharge laser chamber improvements: US7522650 [P]. 2009-04-21.
- [30] Imada G, Masuda W, Yatsui K. Characteristics of excitation discharge of an excimer laser in gas density depletion[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3574: 653-658.
- [31] Albrecht H S, Vogler K W, Schroeder T. Laser gas replenishment method: US6389052[P]. 2002-05-14.
- [32] Hori T, Yabu T, Ishihara T, et al. Feasibility study of 6 kHz ArF excimer laser for 193 nm immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 1285-1292.
- [33] 刘斌, 丁金滨, 周翊, 等. 准分子激光器中放电冲击波的仿真研究[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0901001.
Liu B, Ding J B, Zhou Y, et al. Simulation of discharge shock waves in excimer laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0901001.
- [34] Elliott D L. Ultraviolet laser technology and applications[M]. New York: Academic Press, 2014.
- [35] Jursich G M, von Drasek W A, Brimacombe R K, et al. Gas contaminant effects in discharge-excited KrF lasers[J]. Applied Optics, 1992, 31(12): 1975-1981.
- [36] Sumitani A, Andou S, Watanabe T, et al. Output stabilization technology with chemical impurity control on ArF excimer laser[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4000: 1424-1434.
- [37] Gong M X, Watson T A, Das P P, et al. Fluorine control system with fluorine monitor: US6240117[P]. 2001-05-29.
- [38] Rule J A, Morton R C, Fleurov V V, et al. Automatic gas control system for a gas discharge laser: US6963595[P]. 2005-11-08.
- [39] Dunstan W J, O'Brien K M, Jacques R N, et al. Laser gas injection system: US7835414[P]. 2010-11-16.
- [40] O'Brien K, Dunstan W J, Riggs D, et al. Performance demonstration of significant availability improvement in lithography light sources using GLX control system[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6924: 69242Q.
- [41] Bauer M, Bischoff M, Jukresch S, et al. Exterior surface damage of calcium fluoride outcoupling mirrors for DUV lasers[J]. Optics Express, 2009, 17(10): 8253-8263.
- [42] Tei D, Hattori M, Kumazaki T, et al. Laser-induced damage and defect analysis of calcium fluoride window caused by the high pulse repetition rate of ArF excimer laser radiation[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10805: 108050H.
- [43] Wang J, Cox G P. ArF laser-induced damage of

- calcium fluoride windows with protected anti-reflection coatings[J]. *Optical Engineering*, 2020, 60(3): 031007.
- [44] Komine N, Sakuma S, Shiozawa M, et al. Influence of sodium impurities on ArF excimer-laser-induced absorption in CaF₂ crystals[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(22): 3925-3930.
- [45] Huang C, Saethre R, Melcher P, et al. Low jitter and drift high voltage IGBT gate driver[C]//Digest of Technical Papers. PPC-2003.14th IEEE International Pulsed Power Conference, June 15-18, 2003, Dallas, TX, USA. New York: IEEE Press, 2003: 127-130.
- [46] Kakizaki K, Sasaki Y, Inoue T, et al. High-repetition-rate (6 kHz) and long-pulse-duration (50 ns) ArF excimer laser for sub-65 nm lithography[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(3): 035109.
- [47] Wakabayashi O, Ariga T, Kumazaki T, et al. Beam quality of a new-type MOPO laser system for VUV laser lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5377: 1772-1780.
- [48] Duocastella M, Arnold C B. Bessel and annular beams for materials processing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(5): 607-621.
- [49] Siegman A E, Sasnett M W, Johnston T F. Choice of clip levels for beam width measurements using knife-edge techniques[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, 27(4): 1098-1104.
- [50] Liu Y, Caffey J, Artioukov I, et al. Focus ability of a capillary discharge-pumped soft X-ray laser beam [J]. *Proceedings of SPIE Vol. 4505, Soft X-Ray Lasers and Applications IV*, (12 December, 2001).
- [51] 杨晓冬, 邵建新, 廖生鸿, 等. 刀口法测量高斯光束光斑半径研究[J]. *激光与红外*, 2009, 39(8): 829-832. Yang X D, Shao J X, Liao S H, et al. Investigation on measuring beam width of the Gaussian beam by knife-edge method[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(8): 829-832.
- [52] Mann K, Bayer A, Lübbecke M, et al. Comprehensive laser beam characterization for applications in material processing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7202: 116-126.
- [53] Lin B J. Making lithography work for the 7-nm node and beyond in overlay accuracy, resolution, defect, and cost[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 143: 91-101.
- [54] Yashiro M, Oouchi T, Tsushima H, et al. Excimer laser gas usage reduction technology for semiconductor manufacturing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10147: 482-487.
- [55] Miyamoto H, Kumazaki T, Tsushima H, et al. The next-generation ArF excimer laser for multiple-patterning immersion lithography with helium free operation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9780: 198-203.
- [56] Dinesh K, Yzzer R, Ted C, et al. Neon reduction program on cymer arf light sources[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9780: 97801H.
- [57] Gross E, Padmabandu G G, Ujzdowski R, et al. Enabling CoO improvement thru green initiatives[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9426: 942626.
- [58] Roman Y, Cacouris T, Kanawade D, et al. DUV light source sustainability achievements and next steps [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10587: 1058716.
- [59] Finders J, Dusa M, Mulkens J, et al. Solutions for 22-nm node patterning using ArFi technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7973: 79730U.
- [60] Conley W, Alagna P, Shieh J, et al. The impact of lower light source bandwidth on sub-10 nm process node features[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10147: 42-54.
- [61] Alagna P, Rechtsteiner G, Timoshkov V, et al. Lower BW and its impact on the patterning performance [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9780: 978008.
- [62] Oga T, Matsumoto S, Yamazaki T, et al. ArF lightsource "GT66A" for next-generation immersion lithography enhancing EPE and CD performance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11613: 116130T.
- [63] Pflanz T, Huber H. Compact excimer laser light source for optical (mask) inspection systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4349: 180-184.
- [64] Solarz R W. Coherent DUV illumination for semiconductor wafer inspection: US7295739[P]. 2007-11-13.
- [65] Esser H G, Schillinger H. High repetition rate excimer laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6106: 61061I.