

ArF 准分子激光光源电极系统设计与电场仿真研究

陈进新^{1,2} 徐向宇¹ 王宇¹

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094; ²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 电极系统是 ArF 准分子激光光源的核心部件。首先通过对 ArF 准分子激光光源电极系统的初步设计, 得到合适的放电区尺寸, 提供了电极和预电离电极电压的加载方式, 从而形成由阴极、阳极、预电离电极、陶瓷件和工作气体五部分组成的电极系统简化模型。然后基于该电极系统简化模型, 在不同电压加载条件下进行了电场仿真。仿真结果表明, 放电区域电场分布均匀对称, 电极系统设计较为合理。

关键词 激光器; ArF 准分子激光器; 电极系统; 电场仿真; 放电区域; 加载电压

中图分类号 TN242I; TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.011402

Electrodes System Design and Electric Field Simulation Research of ArF Excimer Laser

Chen Jinxin^{1,2} Xu Xiangyu¹ Wang Yu¹

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Since electrodes system is the key part of ArF excimer lasers, this paper is devoted to study the electrodes system of ArF excimer laser. By proper design of electrodes system, the optimized size of discharge zone is given and the approach of on-load voltage for cathode, anode and preionization electrodes is provided. Then a simplified configuration of electrodes system, consisting of cathode, anode, preionization electrodes, ceramic materials and working gases, is obtained. The electric field under different on-load voltages is calculated based on the simplified configuration of electrodes system. Simulation results show that electric field of discharge region is symmetrical, and the design of electrodes system is reasonable.

Key words lasers; ArF excimer laser; electrodes system; electric field simulation; discharge region; on-load voltage

OCIS Codes 140.2180; 140.3380; 140.5560

1 引言

光刻机是极大规模集成电路制造装备及成套工艺中必不可少的关键设备, 而准分子激光曝光光源是光刻机系统的核心部件之一^[1]。作为当前国际主流光刻曝光光源, 借助于其他辅助技术创新, 193 nm 准分子激光光源可以实现并满足直至 22 nm 特征尺度的高精度光刻需求。193 nm ArF 准分子激光光源是当前唯一一种技术成熟度高、应用可实现性强的曝光光源^[2-4]。

ArF 准分子激光光源基于气体放电激光辐射机制^[5]。高压气体自持放电是准分子跃迁辐射的前提, 放电时间一般持续几十纳秒, 在如此超短的时间间隔内所发生的电场演变过程对于激光输出质量起到了至关重要的作用。

电极系统是 ArF 准分子激光光源的核心部件, 良好的电极系统结构设计、材料选择和放电特性控制是

收稿日期: 2013-08-01; 收到修改稿日期: 2013-09-06; 网络出版日期: 2013-12-18

基金项目: 国家重大科技专项

作者简介: 陈进新(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事准分子激光器结构设计方面的研究。E-mail: ashion@aoe.ac.cn

导师简介: 王宇(1963—), 男, 研究员, 主要从事准分子激光器、激光技术与应用、材料科学、空间工程与技术等方面的研究。E-mail: wangyu@aoe.ac.cn

保持均匀稳定的气体放电的基础。在高重复频率放电条件下,电极系统的放电稳定性直接制约着激光脉冲能量和光束质量的稳定性。

ArF准分子激光光源电极系统的研究涉及腔内工作气体配比、主电极的设计、预电离电极的设计、腔体结构设计、气动流场分析、放电特性控制等多方面的内容。本文首先通过电极系统初步设计,得到放电区尺寸及电极、预电离电极电压加载方式,从而形成由阴极、阳极、预电离电极、陶瓷件、工作气体五部分组成的电极系统简化模型;然后基于该电极系统简化模型,在不同电压加载条件下进行电场仿真,得到电极系统的电场仿真结果,并对仿真结果进行分析,验证电极系统初步设计的合理性。

2 电极初步设计

如图1所示,准分子激光光源一般有圆形腔和矩形腔两种不同的腔型,主要由腔体结构、风机系统、冷却系统、电极系统等组成^[6-9]。圆形腔的优点是腔体结构紧凑、体积和质量都相对较小,缺点是放电区流场有效流速较小且流速不均匀;矩形腔的优点是放电区流场均匀饱满、有效流速较大,缺点是因增加放电区两端的缓冲流道而导致的腔体体积和质量都较大。

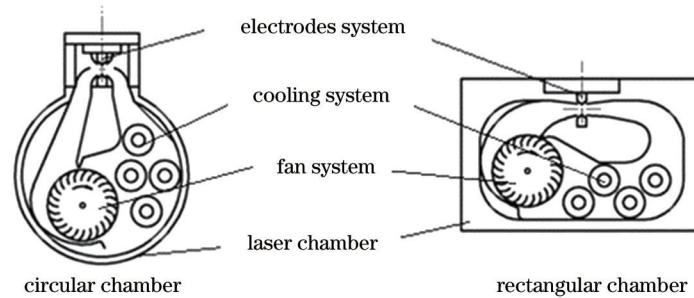


图1 准分子激光光源腔体构成图

Fig.1 Structure of excimer laser chamber

假设激光光源输出激光光束尺寸要求为 $18\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,故放电区尺寸宽度 $a=3\text{ mm}$ 。为了避免放电电极对光束质量的影响,放电区尺寸高度 h 须略大于光束尺寸高度,取 $h=20\text{ mm}$ 。

如图2所示^[5],当抽运能量密度增大到一定程度后,ArF准分子激光光源效率维持在最大值2%附近。为确保激光光源电光转换效率、降低系统成本,最大能量密度选为 2.5 MW/cm^3 。假设泵浦电源主放电时间为 60 ns ,可得到放电区单位体积的注入能量为 $\varepsilon \leq \frac{2.5 \times 10^6\text{ W} \times 60 \times 10^{-9}\text{ s}}{10^{-6}\text{ m}^3} = 1.5 \times 10^5\text{ J/m}^3$ 。若激光光源放电腔

输出激光功率和重复频率要求为 80 W 和 4 kHz ,则单脉冲激光输出能量 $E_m \geq \frac{80\text{ W}}{4000\text{ Hz}} = 0.02\text{ J}$,电光转换效率

$\eta \leq 2\%$,故放电区尺寸长度 $l = \frac{E_m/\eta}{\varepsilon \cdot a \cdot h} \geq 111\text{ mm}$,给予一定裕度,取放电区尺寸长度 $l=200\text{ mm}$ 。

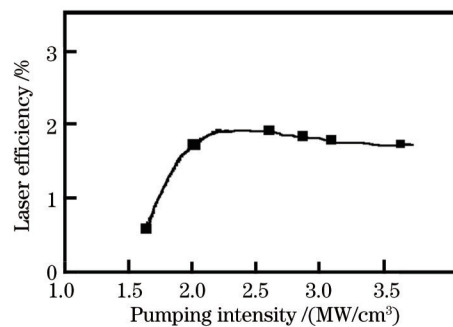


图2 ArF准分子激光光源效率和抽运能量密度关系图

Fig.2 Relationship between efficiency and pumping intensity of ArF excimer laser

本研究采用了目前国际通用的负脉冲电源抽运方式。同时考虑到放电电极安装及抽运电源加载方便,选择阴极上加负高压、阳极接地的加载方式。为了获得更稳定的阴阳主电极区域的辉光放电,在主电极附近需要引入放电形式的预电离^[10-15]。预电离的作用是在主放电建立前在两主电极之间产生足够大的电子密

度,保证主放电区域的稳定辉光放电。本研究创新性地引入了双陶瓷管电位感应式预电离方式,具体做法如图3所示,将阴极端的预电离电极和阳极端的预电离电极连接起来保持等电势,阴极、预电离电极、阳极之间的陶瓷管相当于两个等大的电容。因此当在阴极上加负高压、阳极接地时,通过感应,预电离电极上电压为主电极上负高压的一半。

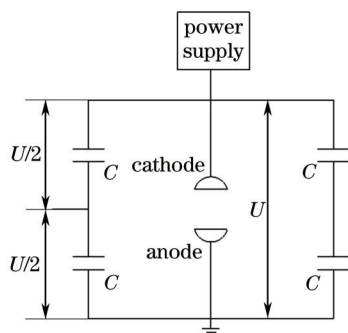


图3 放电区简化电路图

Fig.3 Simplified circuit diagram of discharge region

电极系统材料的选择是影响放电腔寿命的关键因素。考虑到发射电子的阴极受腐蚀程度远大于阳极,选取阳极材料为铝青铜,阴极材料为黄铜,预电离电极材料为黄铜。因阴极和预电离电极上都有负高压,在将阴极和预电离电极固定到接地的腔体上时,需要使用绝缘材料。考虑到绝缘材料需要满足高温高压使用条件,具有耐腐蚀性能、优良力学性能,选取的绝缘材料为高纯 Al_2O_3 陶瓷材料。

如图4所示,电极系统简化模型主要由五部分组成,分别为阴极、阳极、预电离电极、陶瓷件、工作气体。圆环形截面的陶瓷管中套入圆形截面的预电离电极,且陶瓷管内径与预电离电极外径近似相等以减少气隙带来的电容影响;陶瓷支撑件固定住陶瓷管,使陶瓷管外壁紧贴在阴极和阳极上;阴极端的预电离电极和阳极端的预电离电极端部用铜丝连接起来,连接时需注意表面光滑及圆角折弯,避免尖端放电损失能量;阴极、阳极、预电离电极、陶瓷件都处于工作气体环境中。

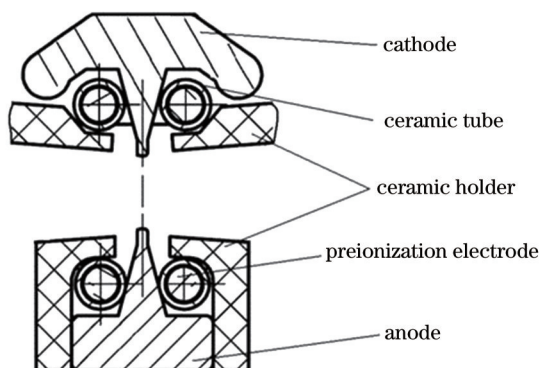


图4 电极系统简化模型图

Fig.4 Simplified configuration of electrodes system

3 放电电场仿真结果及分析

ArF准分子激光光源工作气体由氙气、氟气、氦气等组成,取工作气体的击穿强度为 $1 \times 10^6 \text{ V/m}^{[16]}$ 。 Al_2O_3 陶瓷的击穿强度取为 $1 \times 10^7 \text{ V/m}^{[17]}$ 。

针对如图4所示的模型,利用ANSYS软件进行建模仿真。选取阳极的电阻率为 $0.2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$;阴极和预电离电极的电阻率为 $0.07 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$;工作气体的相对介电常数为1;绝缘陶瓷材料的电阻率为 $1 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$,相对介电常数为 $10^{[17]}$ 。在赋材料属性之后,对阳极、阴极和预电离电极进行加密网格划分,其余部分采用自动网格划分。

对模型的阴极加电压 -20 kV ,阳极加电压 0 (接地),预电离电极加电压 -10 kV ,得到模型的整体电场分布仿真结果如图5所示。由图5可知,此种加载条件下放电区域工作气体已经完全被击穿,且放电区域电场

分布较均匀对称,说明电极系统设计较为合理。陶瓷管电场分布仿真结果如图6所示。由图6可知,陶瓷管部分最大电场强度约为 7.3×10^6 V/m,小于陶瓷管的击穿强度,说明此种加载条件下陶瓷管工作正常,没有发生电击穿。

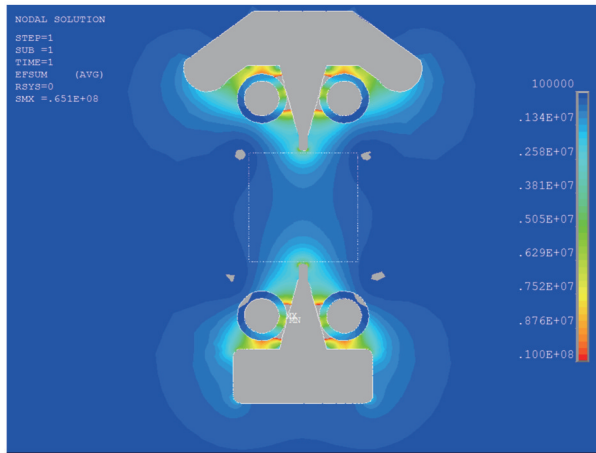


图5 电极系统电场仿真结果

Fig.5 Electric field simulation result of electrodes system

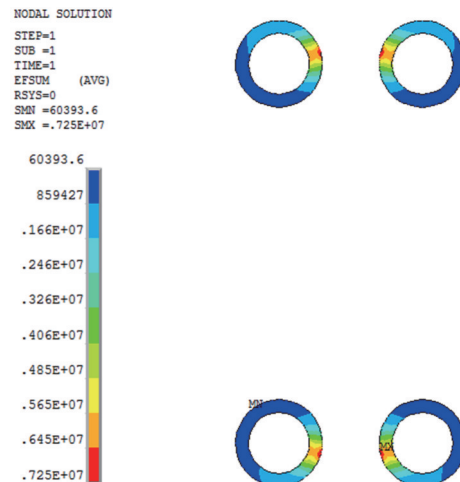


图6 陶瓷管电场仿真结果

Fig.6 Electric field simulation result of ceramic tube

改变电压加载条件,阴极分别加载-1、-2、-5、-10 kV,预电离电极分别加载-0.5、-1、-2.5、-5 kV,阳极都加载0,仿真结果如图7所示。仿真结果表明当阴极电压加载到-1 ~ -2 kV时,预电离电极与阴/阳极之间的工作气体开始被击穿放电;随着加载电压的增加,被击穿的气体区域逐渐增大[图7(a)、(b)]。当阴极加载电压为-5 kV时,阴极和阳极间的气体开始发生电离[图7(c)]。当阴极加载电压-10 kV以上时,阴阳电极间的气体完全被击穿,如图7(d)所示,阴阳电极头部附近的放电区域有明显的工作气体被电离,可以将这部分工作气体视为导体,进一步的在同等加载条件下需重新改变该部分工作气体参数进行仿真计算,被电离的工作气体部分将不断扩大,如此往复迭代而认为阴阳电极间已经形成电子流注而转入自持放电阶段,最终气体完全被击穿。

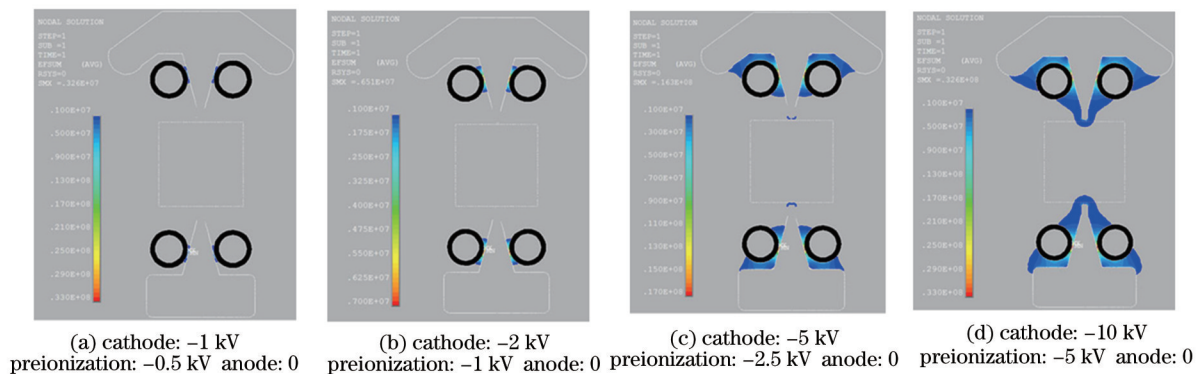


图7 不同电压加载条件下电极系统电场仿真结果

Fig.7 Electric field simulation result of electrodes system under different on-load voltages

4 结 论

首先通过ArF准分子激光光源的电极系统设计,得到放电区尺寸及电极、预电离电极电压加载方式,从而形成由阴极、阳极、预电离电极、陶瓷件、工作气体五部分组成的电极系统简化模型。

基于电极系统简化模型,在不同电压加载条件下进行电场仿真,得到电极系统的电场仿真结果,并对仿真结果进行分析。仿真结果表明:当阴极电压加载到-1 ~ -2 kV时,预电离电极与阴/阳极之间的工作气体开始被击穿放电;随着加载电压的增加,被击穿的气体范围增大;当阴极加载电压-5 kV时,阴极和阳极间的气体开始电离;可以认为,当阴极加载电压-10 kV以上时,阴阳极间的气体开始完全被击穿;当阴极加载电

压-20 kV时,放电区域电场分布较均匀对称,且陶瓷管没有被击穿,说明电极系统初步设计合理。

由于本文涉及到的仿真为电极系统截面的二维电场仿真,后期工作可以增加第三维放电区尺寸长度,仿真出电极系统的三维电场分布。另外还可搭建一个电极系统试验验证平台,评估和验证计算和仿真分析结果。

参 考 文 献

- 1 Yao Hanmin, Hu Song, Xing Tingwen. Optical Projection Exposure Micro-nano Processing Technology[M]. Beijing: Beijing Industry University Press, 2006. 1.
姚汉民,胡松,邢廷文.光学投影曝光微纳加工技术[M].北京:北京工业大学出版,2006. 1.
- 2 Hiroshi Umeda, Hiroaki Tsushima, Hidenori Watanabe, et al.. Ecology and high-durability injection locked laser with flexible power for double-patterning ArF immersion lithography [C]. SPIE, 2011, 7973: 79731K.
- 3 Akihiko Kurosu, Masaki Nakano, Masanori Yashiro, et al.. A reliable higher power ArF laser with advanced functionality for immersion lithography [C]. SPIE, 2012, 8326: 83261F.
- 4 Takeshi Asayama, Youichi Sasaki, Takayuki Nagashima, et al.. Power up: 120 watt injection-locked ArF excimer laser required for both multi-patterning and 450 mm wafer lithography [C]. SPIE, 2013, 8683:86831G.
- 5 Dirk Basting, Gerd Marowsky. Excimer Laser Technology [M]. Berlin: Springer, 2005. 1.
- 6 James H Azzola, Paul R Marsden, Richard C Ujazdowski. Shock Wave Dissipating Laser Chamber [P]. US Patent 6212211 B1, 2001-04-03.
- 7 Igor Bragin, Vadim Berger, Uwe Stamm, et al.. Discharge Unit for a High Repetition Rate Excimer Laser [P]. US Patent 6414978 B2, 2002-07-02.
- 8 Hori Tsukasa, Yabu Takayuki, Kakizaki Koji. Two-Stage Excimer Laser Device for Exposure [P]. Japan Patent JP 2007-250666 A, 2007-09-27.
- 9 Matthias Scholz, Johannes Schurack, Edgar Spranz, et al.. Electrically Excited Gas Discharge Laser for Generating High-Repetition Frequency Light Pulses and Method for the Production Thereof [P]. US Patent 7672354 B2, 2010-03-02.
- 10 Fujimoto Junichi, Mizoguchi Hakaru. Gas Laser Apparatus [P]. US Patent 5663977, 1997-09-02.
- 11 Shunsuke Yoshioka, Natsushi Suzuki. Discharge Electrodes Structure for Laser Apparatus and Laser Apparatus There-with [P]. US Patent 6608853 B1, 2003-08-19.
- 12 Koji Kakizaki, Kazuaki Hotta, Motohiro Arai. Corona Preionization Electrode Unit for Use in Gas Laser Apparatus [P]. US Patent 6654402 B1, 2003-11-25.
- 13 Igor Bragin, Vadim Berger, Ivan Tassy-Julien, et al..Corona Preionization Assembly for a Gas Laser [P]. US Patent 6757315 B1, 2004-06-29.
- 14 Raul Martin Wong Gutierrez. Pre-Ionizer for Pulsed Gas-Discharge Laser [P]. US Patent 7693207 B2, 2010-04-06.
- 15 Vladimir Vasilyevich Atezhev, Sergel Karenovich Vartapetov. Gas-discharge laser [P]. US Patent 20100098128 A1, 2010-04-22.
- 16 E Kuffel, W S Zaengl, J Kuffel. High Voltage Engineering Fundamentals [M]. Oxford: Butterworths Heinemann, 2000. 281.
- 17 Zeng Zhengming. Handbook of Mechanical Engineering Material: Non-Metallic material [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. 547.
曾正明.机械工程材料手册:非金属材料[M].北京:机械工业出版社,2004. 547.