

文章编号: 0258-7025(2010)02-0370-04

# 固体开关小能量准分子激光器的设计与实验研究

游利兵 梁 勛 余吟山

(中国科学院安徽光学精密机械研究所,安徽省光子器件与材料重点实验室,安徽 合肥 230031)

**摘要** 准分子器件重复频率高于千赫兹时,闸流管作为传统的放电开关由于寿命瓶颈而不能满足长期稳定工作的要求。采用固体开关结合磁脉冲压缩技术的固态脉冲功率模块(SSPPM)来替代闸流管进行高压快速放电,激光器可在高重复频率下长寿命运行。设计了无闸流管的固体开关小能量准分子激光器,其核心技术是基于 SSPPM 的应用,并采用金属-陶瓷结构腔体和电晕预电离以延长气体工作寿命。电极放电电压 10~14 kV,电压上升时间约 150 ns,抽运功率密度 3.9~7.6 MW/cm<sup>3</sup>。ArF 运转时,获得最大单脉冲能量 11 mJ 激光输出,最高重复频率 300 Hz。其输出指标可满足当前准分子眼科设备、光谱学研究等需要。

**关键词** 激光器;准分子;固态脉冲功率模块;金属-陶瓷结构;电晕预电离

中图分类号 TN248.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0370

## Design and Experimental Study of an Excimer Laser Based on Solid State Pulsed Power Module

You Libing Liang Xu Yu Yinshan

(Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** Thyatron-based excimer lasers are not available for some fields where high pulse repetition rate is desired. A thyatron-free alternative is to introduce solid state pulsed power module (SSPPM) which combines solid-state switch with magnetic switch and promises an infinite lifetime. A SSPPM-based ArF excimer with metal-ceramic configuration was designed. Corona pre-ionization was employed to achieve a homogeneous and clean pre-ionization. A 10~14 kV pulse was generated by the SSPPM for electrodes discharge. The risetime of the pulse was about 150 ns. Under the pumping density of 7.6 MW/cm<sup>3</sup> the maximum laser output energy of 11 mJ was obtained at 193 nm. The maximum repetition rate was up to 300 Hz. This laser may satisfy the applications such as laser vision correction, dermatological treatment and spectroscopy.

**Key words** lasers; excimer; solid state pulse power module; metal-ceramic configuration; corona pre-ionization

## 1 引 言

小能量准分子激光器广泛应用于工业、医疗和科研等领域<sup>[1~7]</sup>。实用小能量准分子激光器一般采用闸流管释放高压储能电容器中的能量来产生快放电激励。该模式优点是结构紧凑、主放电回路简单。但在诸如半导体光刻等应用领域,准分子激光器重复频率达数千赫兹,闸流管的约 10<sup>9</sup> 次脉冲放电寿

命显得有限,加之闸流管的残余振荡、预热启动及其老化过程中的自导通等缺点使上述快放电模式不能适应这些应用的需求<sup>[8]</sup>。固态脉冲功率模块(SSPPM)利用功率半导体开关结合多级磁脉冲压缩开关的方法产生高压快脉冲来替代闸流管,能避免上述基于闸流管器件的缺点<sup>[8,9]</sup>。半导体开关和磁脉冲开关在长期高重复频率条件下性能无明显下

收稿日期:2009-04-01;收到修改稿日期:2009-04-09

基金项目:中国科学院安徽光学精密机械研究所所长基金(130500010301)资助项目。

作者简介:游利兵(1981—),男,博士研究生,主要从事准分子激光技术方面的研究。E-mail:youlibing@126.com

导师简介:余吟山(1945—),男,研究员,博士生导师,主要从事准分子激光方面的研究。

E-mail:ysyu@aiofm.ac.cn(通信联系人)

降,所以这一技术几乎不考虑寿命问题<sup>[10~12]</sup>。准分子激光器工作时,由于工作气体的消耗和杂质的生成,激光能量逐渐下降。延长激光工作气体使用寿命一直是准分子激光技术研究的重点之一。金属-陶瓷腔结构和洁净的电晕预电离技术能有效降低杂质的生成和工作气体的消耗,加上 SSPPM 的低残余振荡回路,减小了电极的磨损和溅射物的生成,气体使用寿命明显提高<sup>[8]</sup>。

设计了基于三级磁脉冲压缩的 SSPPM 驱动小能量准分子激光器,激光腔体尝试采用金属-陶瓷结构和电晕预电离设计。腔体工作气压 0.6 MPa,电极放电电压 10~14 kV,激光放电稳定,获得 ArF 193 nm 最大输出 11 mJ。

## 2 SSPPM 设计

准分子激光工作特性决定抽运系统必须具有高的功率密度和短的脉冲上升时间<sup>[13]</sup>。实用器件中,基于闸流管的激励系统抽运脉冲上升时间约为 100~150 ns<sup>[8]</sup>。针对输出 5~10 mJ 小能量激光应用,设计全固态脉冲电源输出最大电压 14 kV,最大脉

冲能量 0.7 J,脉冲上升时间小于 150 ns。

设计的磁脉冲压缩全固态脉冲电源如图 1 所示。限于国产可控硅电流上升率和额定电压指标限制,本电路中初级脉冲上升极限约 5  $\mu\text{s}$ ,要达到最终输出脉冲上升时间小于 150 ns,磁开关必须实现脉冲压缩约 33 倍以上,选择三级磁脉冲压缩。

图中  $C_0, L, S_1, S_2, C_1$  构成一电压可控谐振充电回路,充电控制电路通过实时检测低压储能电容  $C_1$  的电压值与设定值比较,当  $C_1$  达到设定值时,开关  $S_1$  导通,谐振回路对  $C_1$  充电结束。控制  $C_1$  电压可调节最终输出脉冲能量。可控硅  $S_3$  导通, $C_1$  通过脉冲变压器对  $C_2$  充电,在  $C_2$  电压 5  $\mu\text{s}$  的上升过程中,磁开关  $MS_1$  处于未饱和状态,可近似认为断路;当  $C_2$  电压达到最高时, $MS_1$  正好饱和,此时被视为一小电感, $C_2$  对  $C_3$  快速放电,脉冲上升时间为 0.75  $\mu\text{s}$ ,从而实现了磁开关的脉冲压缩作用。同理,经过  $MS_2, MS_3$  的压缩过程,电容  $C_d$  上的电压上升时间达到 150 ns 以下,最后电极对工作气体数十纳秒快速放电抽运产生准分子激光。

磁开关饱和前后电感值表示为

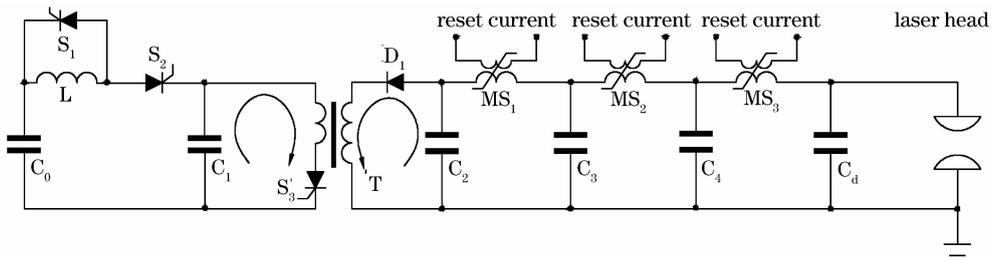


图 1 SSPPM 主回路示意图

Fig. 1 Simplified circuit schematic of SSPPM

$$L_{\text{unsat(sat)}} = \frac{\mu_0 \mu_{\text{unsat(sat)}} AN^2}{l}, \quad (1)$$

式中  $\mu_0$  为真空磁导率; $\mu_{\text{unsat}}, \mu_{\text{sat}}$  分别为磁开关饱和前、饱和后磁芯的相对磁导率; $A$  为磁芯有效截面积; $N$  为磁开关绕线匝数; $l$  为磁开关平均磁路长度。

磁开关的耐压时间与磁开关参数关系可表示为

$$\int_0^{T_{\text{sat}}} V(t) dt = N \Delta B A, \quad (2)$$

式中  $T_{\text{sat}}$  为磁开关耐压时间, $V(t)$  为磁开关承受电压, $\Delta B$  为磁芯材料磁通密度摆幅。

磁开关参数计算主要依据(1),(2)式及电路振荡参数计算公式。

按图 1 所示, $C_1$  为 2.2  $\mu\text{F}$  低压储能电容, $T$  为升压脉冲变压器, $S_3$  为主开关,选用 2500 V,

600 A/ $\mu\text{s}$  电流上升率可控硅。 $C_2, C_3, C_4$  均为 8.16 nF,30 kV 高压陶瓷电容, $C_d$  取 7.1 nF,20 kV 高压陶瓷电容。磁开关  $MS_1, MS_2, MS_3$  采用国产铁基非晶和纳米晶材料,详细设计参数如表 1 所示。磁开关复位采用直流复位电路。

表 1 磁开关设计参数

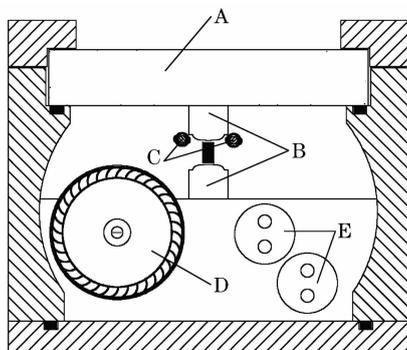
Table 1 Design parameters for magnetic switches

	First stage	Second stage	Third stage
Material	1K101	1K107	1K107
$B_s/\text{T}$	1.56	1.25	1.25
$\Delta B/\text{T}$	2.7	2.1	2.1
Total cross section / $\text{cm}^2$	11.25	7.2	2.4
Magnetic length /cm	20.4	16.4	16.4
Number of turns	26	6	4

### 3 金属-陶瓷结构腔体与电晕预电离设计

工作气体寿命主要受激光腔体材料和放电生成物影响。ArF, KrF 准分子激光器中, 腔体曾选用合金铝和氟塑料作为主要结构材料。研究发现, 导致激光能量下降的主要原因是工作气体中氟气与含碳材料反应生成激光淬灭物质  $CF_4$ 。高纯三氧化二铝陶瓷材料具有优秀的耐氟能力和良好的机械性能, 在激光放电条件下产生的  $CF_4$  远远低于聚四氟乙烯材料<sup>[14,15]</sup>。金属-陶瓷腔结构替代金属-聚合物腔体结构是准分子腔体结构的发展趋势。

设计的小能量高重复频率金属-陶瓷腔体如图 2 所示。A 为 95% 高纯陶瓷板, 长 290 mm, 宽 115 mm, 高 20 mm。其余材料为合金铝。腔内气体容积约 2 L, 腔体耐压试验 0.7 MPa 无渗漏。



A: ceramic plate; B: electrodes;  
C: corona pre-ionization;  
D: circulation fan; E: heat exchanger

图 2 激光腔侧面剖视图

Fig. 2 Cross section of the laser tube

为了使激光放电电极间产生均匀辉光放电, 需要利用预电离产生一定浓度的初始电子, 大能量准分子器件中一般采用紫外火花预电离。达到同等电子密度, 电晕预电离相比之下只需较小的能量, 具有更好的空间均匀性<sup>[16]</sup>, 并且不产生溅射物, 是一种“洁净”的预电离。设计电晕预电离如图 2 中 C 所示, 在阴极两边放置与阳极连接的直径 2.7 mm 不锈钢棒, 不锈钢棒外套内直径 3 mm, 外直径 5 mm 的高纯陶瓷管。陶瓷管紧贴阴极尖锐边缘。电极主放电发生时, 随着阴极电压升高到一定值, 不锈钢棒与阴极尖锐边缘产生电晕放电, 电离电极附近气体, 产生均匀的电子分布密度。

### 4 实验结果

整机实验条件: 气体配比为  $\varphi(F_2) = 0.13\%$ ,  $\varphi(He) = 2.53\%$ ,  $\varphi(Ar) = 1.8\%$ ,  $\varphi(Ne) = 95.54\%$ ,

总气压 0.6 MPa。电压测量采用 Tektronix 1000:1 高压探头 P6015A, 脉冲能量检测使用中国科学院物理所热释电探头 IP-510, 示波器 Tektronix TDS220。SSPPM 中, 三级磁开关总传递效率约 35%。电极放电电压 10~14 kV 可调, 放电能量 0.35~0.68 J。电极 13 kV 放电波形如图 3 所示。电压上升总时间约 150 ns, 前 100 ns 电压上升仅 2 kV, 主要是磁开关的漏电流引起的, 而后 50 ns 电压快速上升, 显然是磁开关导通的结果, 这对快放电十分有利。电极放电时间 25 ns。放电激活区 6 mm × 3 mm × 200 mm, 此时平均抽运功率密度 6.7 MW/cm<sup>3</sup>, 193 nm 出光 10 mJ。按高压电容 C<sub>2</sub> 储能 1.8 J 经磁开关直到出光计算, 电光转换效率约 0.55%。

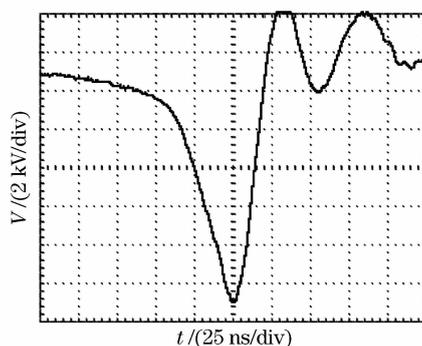


图 3 实验测得的电极间电压波形

Fig. 3 Measured voltage waveform between two electrodes

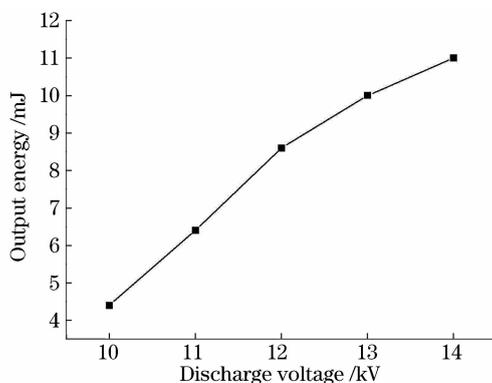


图 4 不同放电电压的输出能量

Fig. 4 Output energy of different discharge voltages

调节不同放电电压测得 193 nm 激光输出能量如图 4 所示, 放电电压 14 kV 时获得最大单脉冲 11 mJ 输出。设定 12 kV 工作电压, 不同激光重复频率时测得输出功率如图 5 所示, 重复频率 300 Hz 时输出功率 1.56 W。

在 10~14 kV 电压下工作时, 电极间放电均匀, 表明电晕预电离能起到较好的预电离效果。金属-陶瓷腔结构和电晕预电离对工作气体寿命的具

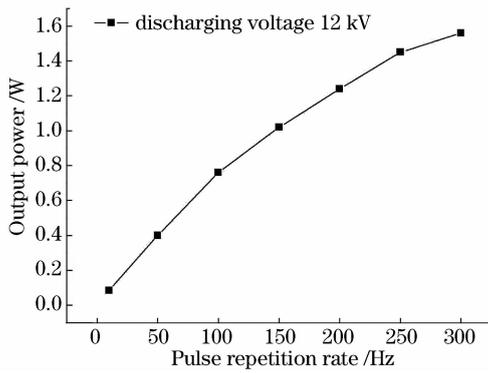


图 5 不同重复频率时的输出功率

Fig. 5 Output power of different pulse repetition rates

体影响将在今后做进一步研究,现阶段只进行一些结构上的尝试。

## 5 结 论

利用国产大功率可控硅和磁芯材料制作的 SSPPM 驱动电晕预电离的金属-陶瓷结构 ArF 准分子激光器,获得最大单脉冲输出能量 11 mJ,最高重复频率 300 Hz。现阶段输出可满足准分子眼科设备、光谱学研究等需要。成功完成了无闸流管开关的准分子激光器的初步实验,但还存在不少缺陷。如磁开关损耗较大,能量传递效率偏低;相对闸流管放电残余振荡数目大大减少,但仍有两峰值较大振荡。改进上述缺陷并提高 SSPPM 充电速度、改善激光腔循环风路和腔体散热系统,以便进一步开展上千赫兹小能量准分子激光器实验。

**致谢** 感谢李会高级实验师、朱章甫师傅、王庆胜和王效顺同学在机械加工及实验调试过程中的帮助。

## 参 考 文 献

- Vladimir Fleurov, Slava Rokitski, Robert Bergstedt *et al.*. XLR 600i: recirculating ring ArF light source for double patterning immersion lithography [C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 69241R
- Hitoshi Sekita, Jun Ichiyana. Compact excimer lasers specific to microlithography and surgery [C]. *SPIE*, 1997, **2987**: 80~87
- Zhiqiang Zhu, Yinshan Yu, Guoqing Deng. Research of cornea

- section's shape ablated by 193 nm ArF laser spots [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11):655~658
- Liu Yongji, Wang Zhaoqi, Lü You *et al.*. Effects of the reflection losses and nonnormal incidence of laser on the eye's visual quality after refractive procedure on a cornea [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7):1101~1104
- 刘永基,王肇圻,吕 尤等. 激光斜入射和反射对角膜屈光手术后人眼成像质量的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7):1101~1104
- Zhao Haoxin, Xu Bing. Position tolerance analysis for wavefront aberrations correction of human eyes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):949~954
- 赵豪欣,许 冰. 矫正器平移和旋转对人眼高阶像差矫正的容限分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5):949~954
- A. Gortler, A. Matern. Compact excimer lasers for metrology and inspection applications [C]. *SPIE*, 2004, **5457**:105~115
- Liao Xian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Simultaneous measurement of high-temperature and strain using a combined long-period fiber grating/Fabry-Perot sensor fabricated by laser pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6):884~888
- 廖 弦,饶云江,冉曾令等. 激光脉冲制作的长周期光纤光栅/法布里-珀罗高温-应变组合传感器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6):884~888
- Partlo Willim, Sandstrom Rick, Fomenkov Igor *et al.*. A low cost of ownership KrF excimer light source using a novel pulse power and chamber configuration [C]. *SPIE*, 1995, **2440**:90~100
- R. Ness, P. Melcher, G. Ferguson *et al.*. A decade of solid state pulsed power development at Cymer INC [C]. 2004 *IEEE International Power Modulator Conference*, 2004. 228~233
- Ness Richard, Melcher Paul C., Smith Brett *et al.*. Performance characterization for an excimer laser solid-state pulsed power module (SSPPM) after 20B shots [J]. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2000, **28**(5):1324~1328
- P. Melcher, D. Johns, B. Partlo *et al.*. Lifetime and reliability data of commercial excimer laser power systems modules [C]. *Proc. Pulsed Power Plasma Science Conference, IEEE*, 2001. 1539~1542
- Walter D. Gillespie, Toshihiko Ishihara, William N. Partlo *et al.*. 6 kHz MOPA light source for 193 nm immersion lithography [C]. *SPIE*, 2005, **5754**:1293~1303
- Lou Qihong, Xu Jie, Fu Shufen *et al.*. Pulsed Gas-Discharge Lasers [M]. Beijing: Science Press, 1993. 243
- 楼祺洪,徐 捷,傅淑芬等. 脉冲放电气体激光器[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 243
- S. Ito, T. Saito, A. Tada. A new gas purifier for ArF excimer lasers [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, **67**(3):658~661
- T. Saito, S. Ito, A. Tada. Long lifetime operation of an ArF-excimer laser [J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 1996, **63**(3):229~235
- Dirk Basting. Excimer Laser Technology: Laser Sources, Optics, Systems and Applications [M]. Göttingen: Lambda Physik AG, 2001. 40