

高效率放电抽运 KrF 准分子激光器

王效顺 余吟山 王庆胜 梁 勳 游利兵 方晓东

(中国科学院安徽光学精密机械研究所激光技术研究中心, 安徽 合肥 230031)

摘要 248 nm 放电抽运 KrF 准分子激光器在微电子学和医学等领域有重要的应用价值。在大多数应用中, 激光器的最大输出效率和能量都是十分重要的参数。为了提高激光器输出效率和能量, 实现 KrF 准分子激光器的稳定放电, 采用新型开关电源和结构紧凑的张氏电极, 并通过优化储能/放电电容比例和工作气体配比等方法, 研制出了一台小型高效率放电抽运 KrF 准分子激光器。研究了开关电源对充放电特性的影响, 以及气体配比对激光输出效率和能量的影响。该激光器的各项参数相比以往的产品有了较大改善, 可重复频率为 1~80 Hz, 输出效率最高达 2.5%, 最大单脉冲输出能量 380 mJ; 当工作电压高于 25 kV 时, 激光输出能量不稳定性约为 1.8%。

关键词 激光器; 准分子激光器; 输出效率; 单脉冲输出能量; 放电抽运; 开关电源

中图分类号 TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.XXXXXXX

A Discharge-Pumped KrF Excimer Laser with High Efficiency

Wang Xiaoshun Yu Yinshan Wang Qingsheng Liang Xu
You Libing Fang Xiaodong

(Research Center of Laser Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract 248 nm discharge-pumped KrF excimer laser is importantly used in microelectronics and medicine. For most applications, maximal output efficiency and energy are very important parameters of a laser. A KrF excimer laser with high efficiency is developed. For obtaining the maximal output efficiency and energy and achieving the stationary discharge of the KrF excimer laser, a new switching power supply, compact electrodes the optimization of storage/discharge capacity, and gas mixture are used to develop a small-type high-efficiency discharge-pumped KrF excimer laser. The effect of switching power supply on the charge/discharge characteristic and the effect of gas mixture on the output efficiency and energy of the laser are studied. Compared with the previous product, the property of the laser is improved considerably. The repetition rate of the laser is 1~80 Hz, the maximal efficiency is about 2.5% and the maximal output energy is up to 380 mJ. The pulse to pulse stability is about 1.8% with discharge voltage above 25 kV.

Key words lasers; excimer laser; output efficiency; signal pulse output energy; discharge pump; switching power supply

OCIS codes 140.2180; 140.3460; 140.5560

1 引 言

近年来, 准分子激光广泛应用于脉冲激光沉积 (PLD)、近视眼矫正角膜屈光手术、薄膜材料的退火以及大规模集成电路的紫外光刻等领域^[1~5]。目前, 国外商品化 KrF 准分子激光器效率最高可达 3%~4.5%, 能量高达 1 J。而国产 KrF 准分子激

光器效率仅为 1% 左右, 输出能量不超过 260 mJ。

本文对准分子激光器的开关电源^[6,7]和电极进行了优化, 研制出了一台高效率放电抽运的准分子激光器, 并通过实验研究了开关电源对激光器充放电特性的影响, 以及工作气体比对激光输出能量和效率的影响。

收稿日期: 2010-03-01; **收到修改稿日期**: 2010-05-19

作者简介: 王效顺(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事准分子激光器及相关器件等方面的研究。

E-mail: wxsh125000@yahoo.com.cn

导师简介: 方晓东(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事准分子激光器以及功能性薄膜的激光制备等方面的研究。

E-mail: xdfang@aiofm.ac.cn(通信联系人)

2 激光器设计及实验

2.1 开关电源

传统准分子激光器谐振充电电源体积庞大,比较笨重。而且此类电源采用“放完即充”的工作模式,使得高压开关元件闸流管和储能电容长期处于加高电压状态,严重影响闸流管和储能电容的寿命。而开关电源对储能电容采用的是“即充即放”工作模式,使储能电容和闸流管承受高压的时间远低于谐振充电模式,闸流管在高电压(高于 30 kV)下能保持长久稳定工作。开关电源功能模块和激光器放电主回路如图 1 所示。开关电源使用半导体二极管整

流桥和紧凑的高压变压器取代了谐振充电电源的高压硅堆整流器、大型工频变压器、谐振电感、谐振电容器、调压器等,体积更小巧。此外,开关电源仅需手动调节重复频率控制信号和输出电压控制信号,相比谐振充电式电源操作更加方便。

2.2 激光头

激光头部分主要包括腔体、储能电容、放电电容、闸流管以及充电电感等部分,激光头放电主回路(见图 1)中, C_s 为储能电容, C_d 为放电电容, L_s 为充电电感, L_m 为放电电感,S 为进口接地栅闸流管(型号 HY3202)。

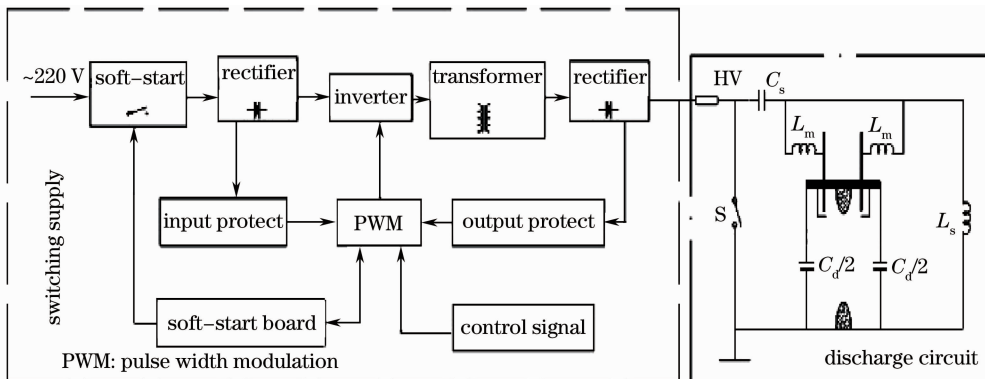


图 1 开关电源激励准分子激光器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of excimer laser with switching power supply

图 2 为激光器腔体结构图。为了达到均匀有效的辉光放电激励效果,通常的中小型激光器多使用张氏电极^[8]。在本设计中,对张氏电极参数进行了计算和优化,电极参数为:长 54.2 cm,宽 3.12 cm,厚 1.8 cm,间距为 2.2 cm。为了改善准分子激光光束质量,实现均匀放电,人们进行了不同研究,如使用各种预电离技术和激光光束均匀器^[9]等方法。目

前,国内放电抽运 KrF 准分子激光器基本采用紫外预电离^[10]电路设计,该激光器紫外预电离针共有 47 个。

实验过程中,使用 Tektronix P6015A 1000× 高压探头测量储能电容两端的电压,并传输至 Tektronix TDS220 型示波器,从而获得激光器充放电波形。激光输出能量和功率的测量使用 LEP 型紫外功率能量计。

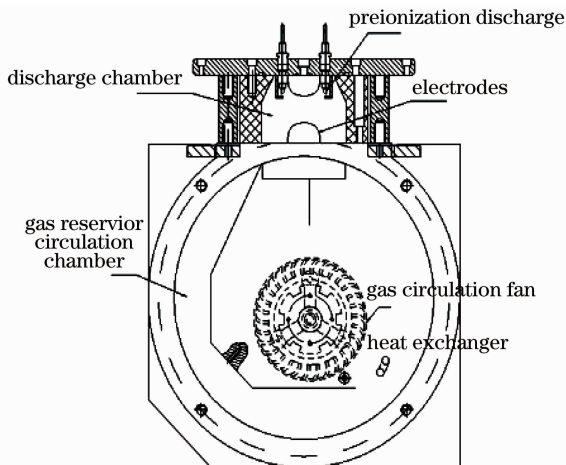


图 2 激光器腔体结构图

Fig. 2 Structure of laser chamber

3 实验结果与讨论

3.1 开关电源对激光器充电特性的影响

开关电源控制及输出信号示意如图 3 所示。当重复频率信号为高电平时,开关管导通,储能电容开始充电;在重复频率信号的下降沿,闸流管接收触发信号导通,电容器放电。因为闸流管采用栅极接地方式,其触发信号为正偏压负脉冲。每个充放电周期内,储能电容和闸流管仅在重复频率信号为高电平时承受高压。而在谐振充电工作方式下,储能电容每次充电结束后至闸流管导通放电经过较长时间等待,这段时间内一直承受高电压负荷,降低了高电压元件(闸流管、储能电容等)的使用寿命。所以相

比谐振充电工作方式,开关电源工作方式下的高电压负荷时间一般设定在 8~15 ms 之间,大大减轻了高电压元件负荷,增加了放电激励系统和激光输出的稳定性。

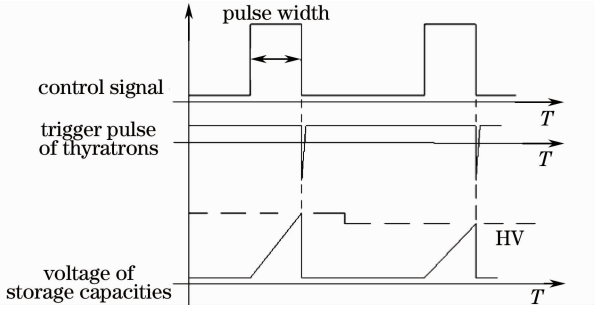


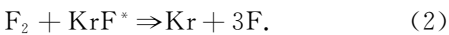
图 3 开关电源控制及输出信号示意图

Fig. 3 Control and output signal sketch of switching power supply

实验中使用的开关电源输出电压高达 42 kV,性能稳定,为采用“高电压+小电容”充电模式提供了条件。相比“低电压+大电容”模式,这种模式不仅使用的电容器数量少,而且放电速度更快且能增大电极宽度,有利于获得高输出能量和效率。

3.2 气体配比对激光输出效率和能量的影响

KrF 准分子激光器腔内气体由卤素气体(F₂)、稀有气体(Kr)和惰性气体(He 或 Ne)3 部分组成。气体放电激励时的主要过程为^[11,12]



如果卤素气体(F₂)含量过低,(1)式生成的准分子 KrF* 就少,激光器输出能量不高;卤素气体(F₂)含量过高,剩余的 F₂ 通过(2)式加速准分子 KrF* 的猝灭,也不利于激光能量的升高。此外,缓冲气体^[13,14]如 He,Ne 等对于准分子激光器是不可缺少的。准分子激光器中常加入 He,Ne 等作为缓冲气体,以便产生更多的激发态粒子,避免产生过多离子。研究表明,缓冲气体的组分(He/Ne)不同激光输出特性也不同。综上所述,准分子激光器腔内总气压及 3 种气体的配比等参数对激光器输出能量和效率有重要的影响。

在 C_s=43.2 nF, C_d=37.8 nF 条件下,选择两种不同的气体配比(见表 1),研究其对激光输出和激光能量输出效率的影响。图 4,5 分别为对应两种配比的能量和效率曲线。实验表明,在气体配比 A 条件下工作气压较低,气体击穿电压阈值低于 B,低电压下(小于 25 kV)仍能稳定放电,效率和能量皆高于 B。当工作电压升高,激光输出最佳总气压逐

渐升高,配比 B 条件下的激光效率和输出能量均超过 A。

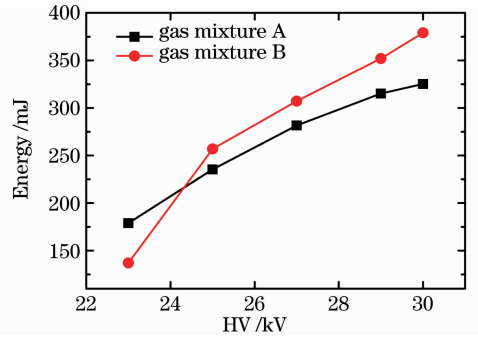


图 4 不同气体配比条件下输出能量-电压关系曲线
Fig. 4 Output energy profile with different gas mixtures as function of discharge voltage

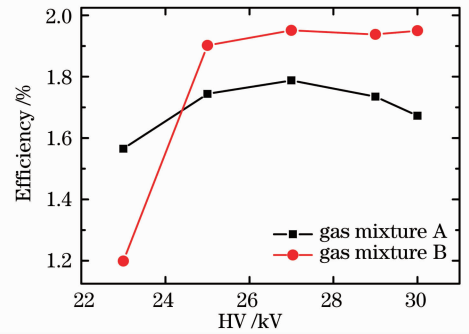


图 5 不同气体配比条件下激光器效率-电压关系曲线
Fig. 5 Laser efficiency profile with different gas mixtures as function of discharge voltage

表 1 A 和 B 气体配比

Table 1 Gas mixtures of A and B

	Gas mixture	Total pressure / KPa
A	V(Ne):V(He):V(Kr):V(F ₂)=	250
	90.40:4.56:4.80:0.24	
B	V(Ne):V(He):V(Kr):V(F ₂)=	330
	94.55:2.30:3.03:0.12	

3.3 电容量值对激光输出效率和能量的影响

激光器的输出效率为单脉冲输出能量平均值与激光器储能 Q 的比,其中 $Q = C_s U^2 / 2$, U 为工作电压值。

准分子激光器输出效率与储能电容和放电电容之间(C-C)能量转移的效率 η 和电压增益 g 密切相关, η 和 g 的表达式为

$$\eta = 4\beta / (\beta + 1)^2, \quad g = 2\beta / (\beta + 1), \quad (3)$$

式中 β 为 C_s 和 C_d 的比值。当 $\beta = 1$ 时,C-C 能量转移的转移效率 η 最大,但电压增益 g 较小。当 β 值增大,g 增大而 η 减小。如果能量转移效率降低,残余的能量产生的振荡会对部件起损坏作用,过于追求 C-C

能量转移的高电压增益而忽视能量转移效率将会对激光输出带来不利影响。所以,实际应用中 β 值不能太大,一般在1.15左右。

如图6,7所示,在气体配比B条件下,方块曲线为 $\beta=1.14$ 时的激光输出能量和效率。保持储能电容 C_s 不变,减少放电电容 C_d ,使得 $\beta=1.33$,激光放电稳定($U \geq 25$ kV)后,激光输出能量和效率略有降低。当 $\beta=1.14$,放电电压为30 kV时,效率为1.95%,单脉冲能量高达380 mJ。

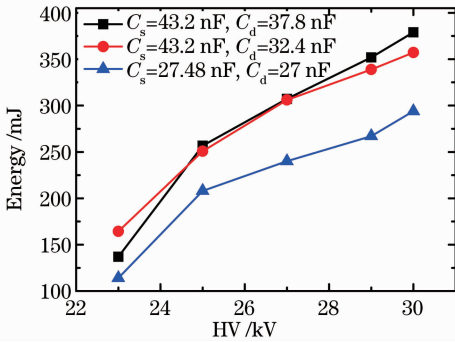


图6 不同电容条件下的激光器输出能量-电压关系曲线

Fig. 6 Output energy profile with different capacities as function of discharge voltage

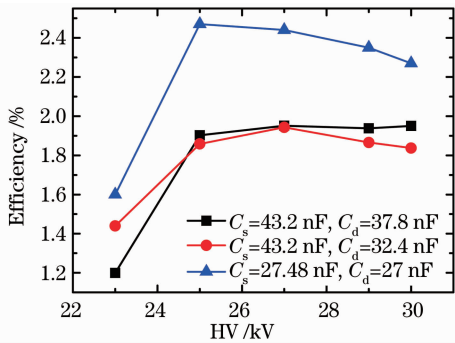


图7 不同电容条件下的效率-电压关系曲线

Fig. 7 Laser efficiency profile with different capacities as function of discharge voltage

为了提高激光器输出效率,同时减少储能电容和放电电容的数量。当 C_s, C_d 变为27.48 nF和27 nF($\beta=1.017$),放电电压为25 kV时,效率高达2.5%,单脉冲能量为208 mJ;30 kV时,效率为2.3%,单脉冲能量为284 mJ。适当减少电容量能够增大激光输出效率,但储能电容 C_s 减少直接导致激光器储能 Q 下降,从而使激光输出能量明显降低(见图6)。

用能量相对标准差 σ 来描述该激光器能量不稳定度,研究发现,当工作电压高于25 kV时,相对标准差值稳定在1.8%以下。此外,通过光斑测量测得激光输出的近场光斑尺寸为8 mm \times 22 mm。

4 结 论

研制了一台高效率放电抽运KrF准分子激光器,并通过实验分析了开关电源工作方式对改善高压开关元件闸流管和储能电容工作状态达到提高其使用寿命和激光系统稳定性的作用,研究了气体配比、电容量值对激光器输出效率和能量的影响。该激光器效率最高达2.5%,单脉冲输出能量高达380 mJ,近场光斑尺寸为8 mm \times 22 mm,性能指标高于国内其他同类产品。此外,用能量相对标准差 σ 来描述该激光器能量不稳定度,当工作电压高于25 kV时,相对标准差值稳定在1.8%以下。

参 考 文 献

- Lou Qihong. Progress of excimer lasers and its applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(5): 361~364
- 楼祺洪. 准分子激光器的发展和应用[J]. *中国激光*, 1994, **A21**(5): 361~364
- Da Li, Xiaodong Fang, Ruhua Tao *et al.*. Transparent conducting CuCr_{1-x}Mg_xO₂ films prepared by pulsed laser deposition [C]. *SPIE*, 2007, **6825**: 68250M
- 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
- Huang Jun, Hong Rongdun, Chen Xiaping *et al.*. Crystallization of amorphous hydrogenated SiC films by KrF excimer laser annealing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 378~382
- 黄俊, 洪荣墩, 陈厦平等. KrF准分子激光退火氢化非晶碳化硅薄膜的晶化研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 378~382
- Three-dimensional particle ultraviolet photo etching[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 9
- 三维微粒紫外光刻技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(1): 9
- Zhang Zhansong, Cai Xuansan. The principle and Design of Switching Power Supply [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 207~262
- 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. 207~262
- You Libing, Liang Xu, Huang Dewen *et al.*. Design of a switching power supply for high repetition excimer laser[J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(3): 15~16
- 游利兵, 梁 勳, 黄德文等. 高重复率小型准分子激光器开关电源设计[J]. *激光杂志*, 2009, **30**(3): 15~16
- T. Y. Chang. Improved uniform-field electrode profiles for TEA laser and high voltage applications[J]. *Rev. Sci. Instr.*, 1973, **44**(4): 405~407
- Gao Hongyi, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Beam homogenizer for XeCl excimer laser and its applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1379~1382
- 高鸿奕, 楼祺洪, 董景星等. XeCl准分子激光光束均匀器及其应用[J]. *光学学报*, 1996, **16**(10): 1379~1382
- S. S. Anufrik, A. P. Volodenkov, K. F. Znosko. Influence of the preionization system on the lasing energy of a XeCl laser[J]. *J. Opt. Technol.*, 2000, **67**(11): 961~967
- Ch. K. Rhodes. Excimer Lasers [M]. Berlin Heidelberg

- New York Tokyo: Springer-Verlag, 1984. 97~100
- 12 Liu Jingru, Yi Aiping, Hu Zhiyun *et al.*. Excimer Laser Technology and Applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. 75~78
刘晶儒, 易爱平, 胡志云 等. 准分子激光技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. 75~78
- 13 Toru Mizunami, Keiji Takagi. Buffer gas effect in a discharge-pumped XeBr excimer laser[J]. *J. Appl. Phys*, 1992, **71**(4): 2036~2038
- 14 S. N. Bagayev, A. M. Razhev, A. A. Zhupikov *et al.*. 1.3 J KrF excimer laser with efficiency 2.5% [C]. *SPIE*, 2003, **5120**: 231~235