

ArF 准分子激光振荡放大系统的研究

赵震声 陈永荣 胡雪金 谷怀民

奚居雄 张 虎 袁廷海 匡 梅

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

姚建铨 吴 峰 施翔春

(天津大学激光与光电子技术研究所, 天津 300072)

摘 要 研究了 ArF 准分子激光振荡放大系统, 中心波长 193 nm。用一只闸流管作为开关元件, 通过主充放电网络匹配, 有效地解决了两台器件的放电抖动, 振荡放大倍数达到约 50 倍, 系统单脉冲输出能量 50 mJ。光束发散角低于 0.20 mrad。

关键词 ArF 准分子激光, 振荡放大。

采用激光振荡放大系统是获得高光谱质量和光束质量的准分子激光一个良好的途径。即从振荡级输出可调谐、高光谱质量的种子光源, 注入非稳腔放大级从而获得高光束质量、较高能量的激光输出。

国内研究准分子激光振荡放大系统的工作不多见, 用 ArF 作为工作介质的准分子激光振荡放大系统没有报道。马树森等^[1]用一个火花球隙控制两台准分子激光器, 实现了 XeCl 激光(308 nm)的单频输出, 带宽 0.07 nm, 发散角 0.2 mrad, 单脉冲能量 11 mJ。向世清等^[2]研究了 X 光预电离的 XeCl 准分子激光振荡放大的一体化特性。成序三等^[3]改造一台 Lumonix 公司生产的 EX-600 型准分子激光器, KrF 激光(248 nm)振荡放大系统的谱线宽度为 2.3×10^{-3} nm, 平均功率 24.4 W。国外从事这个领域的研究比较多, Bigio 等^[4]利用注入锁定的非稳腔输出, 得到峰值功率 10 MW、单脉冲能量 200 mJ、脉宽 20 ns 的 KrF 激光(248 nm), 其光谱带宽 < 0.01 nm, 可调谐范围 1 nm, 1.5 倍的衍射极限。Skordoulis 等^[5]采用双放电器件, 火花球隙作为开关元件, 研究了 F₂ 激光振荡放大系统(157 nm), 最大信号增益为 $5.2 \pm 0.4\% \text{ cm}^{-1}$ 。德国 Lambda Physik 公司生产的^[6]LPX150/50T 型的 ArF(193 nm)准分子激光振荡放大系统, 最大输出能量 125 mJ, 平均功率 6 W, 带宽 3 pm, 锁定效率 90%, 发散角 0.2 mrad。

本文研究了 ArF 准分子激光振荡放大系统, 激光器件采用 LC 快放电回路和紫外光火花预电离, 主放电通道置于聚四氟乙烯材料的放电腔内。本系统采用外腔式结构, 器件谐振腔的全反镜采用铝膜。激光电源采用三相整流的谐振倍压网络。体积较小, 操作简便。

1 激光器的结构和电源电路

准分子激光振荡放大系统由两大部分组成。激光头: 两个互相独立的贮气室和激光腔体(分别作为振荡器和放大器), 振荡放大光路, 光栅调谐机构和充排气系统。激光电源: 高压电源, 充放电回路, 控制电路。

1) 激光腔体结构如图 1 所示: 主放电通道置于聚四氟乙烯腔体内, 贮气室采用不锈钢板制作。主放电通道和紫外光预电离源为一整体, 与激光气室连接。铜质主电极表面镀镍, 阴极电极采用精密加工的改进型张氏面型, 阳极采用 R 型面型, 两个主电极间距约 20 mm, 放电体积为 $20 \times 20 \times 600 \text{ mm}^3$ 。新型设计的预电离火花针均匀排列在阴极电极两侧, 提供紫外火花预电离, 保证主通道均匀放电。

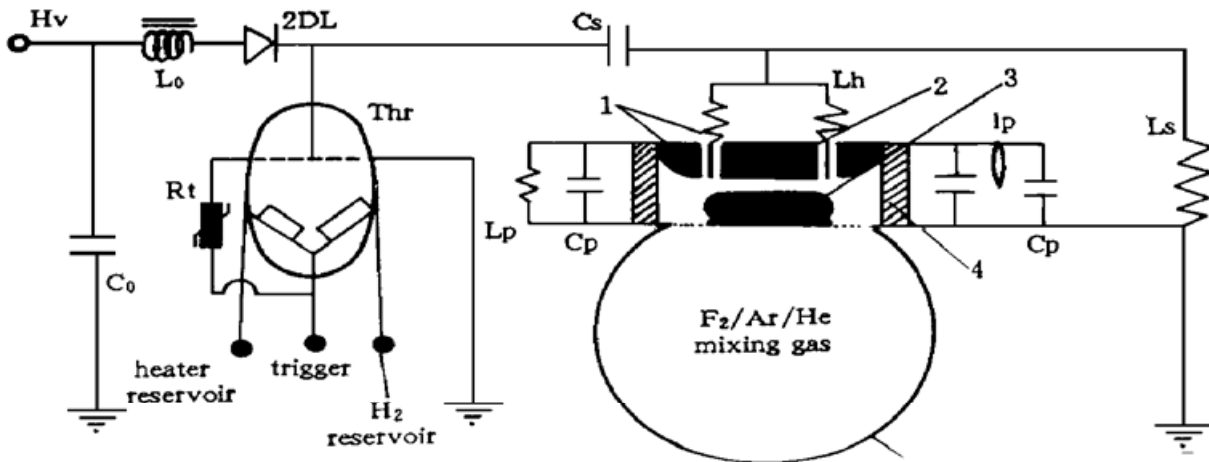


Fig. 1 The cross section, charge and discharge circuit of the ArF excimer laser

1. UV spark preionization pins; 2. cathode; 3. anode; 4. laser chamber; 5. gas cell; C_0 : filtering capacitor; C_s : storage capacitor; C_p : speak capacitor; L_0 : oscillating inductance; L_s : charge inductance; L_p : bypass inductance; L_b : equilibrium inductance; l_p : forming inductance; 2DL: silica diode; Thr: thyatron(4060); R_t : sensitiving resistance

2) 充排气系统, 全部采用精密不锈钢阀门和紫铜配气管道, 结构紧凑, 使用方便。一只真空表($-0.1 \text{ MPa} \sim 0 \text{ MPa}$)监测卤素气体和稀有气体的压强; 另一只真空压力表($-0.1 \text{ MPa} \sim 0.2 \text{ MPa}$)监测工作总气压。

3) 激光器使用 $380 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ 的三相交流电作为工作电源, 采用全波整流和谐振倍压充电技术。本器件采用紫外光火花预电离, LC 快充放电回路。当作为高压开关元件的接地栅闸流管导通时, 储能电容器 C_s 上的电压通过预电离针加到主电极上, 峰化电容 C_p 整形, 使放电通道高压放电均匀, 有利于产生激光。激光电源设置了过压保护, 同步输出和外触发接口。

2 振荡器和放大器谐振腔的设计

2.1 振荡器的设计

振荡器设计为一平平腔结构。输出镜为一块不镀膜的石英平板; 一块 1200 l/mm 的紫外光栅作为全反耦合镜(调整光路时可用一块平板全反镜代替)。振荡器的腔内扩束器采用放大倍数 5 倍的伽利略望远镜系统, 这使振荡器的几何尺寸减少, 同时减小了激光谱线的宽度, 提高信噪比, 最主要降低了作用在光栅上的激光强度密度, 避免光栅的光学损伤。在振荡器

的腔内加了两个小孔光栏,以提高振荡器的光束质量,同时防止从放大器返回的激光损坏振荡器的光学元件。振荡器输出的激光能量约 1~ 2 mJ,具有较高光谱质量和光束质量,这作为放大器的种子光源已经足够了。

2.2 放大器的设计

非稳腔结构的谐振腔能够提供均匀分布的激光模体积,可获近衍射极限的高质量单模光束,易于耦合输出^[7]。故将放大器设计为非稳腔结构,采用正支共焦非稳腔,即

$$R_1 + R_2 = 2L \quad (1)$$

式中 R_1 为输出耦合镜的曲率半径,它决定横模的大小; R_2 为全反镜的曲率半径; L 为谐振腔腔长。对于共焦非稳腔,等效菲涅耳数可以表述成:

$$N_{\text{eff}} = (M - 1)N_F/2 \quad (2)$$

$$N_F = a_1 a_2 / \lambda L \quad (3)$$

式中 N_F 为菲涅耳数, M 为共焦非稳腔的放大率, a_1 和 a_2 分别为共焦腔耦合镜和全反镜的最小直径, λ 为光波波长, L 为非稳腔腔长。共焦腔的放大率 M 为

$$M = 2g_1 g_2 + 2[g_1 g_2 (g_1 g_2 - 1)]^{1/2} - 1 \quad (4)$$

式中 $g_1 g_2$ 是共焦腔的 g 因子。当共焦腔的等效菲涅耳数 N_{eff} 较大时 (> 50), 腔的输出耦合系数为

$$\delta = 1 - 1/M^2 \quad (5)$$

当等效菲涅耳数 N_{eff} 较小时, 腔的输出耦合系数近似为

$$\delta = (1 - 1/M^2)^2 \quad (6)$$

根据上述的非稳腔设计的基本原理, 本文将放大器设计成一个正支共焦非稳腔, 其中: 输出镜曲率半径 $R_1 = 600$ mm; 全反镜曲率半径 $R_2 = 2606$ mm; 腔长 $L = 1003$ mm。为了方便调腔, 并且防止振荡器和放大器的寄生振荡, 谐振腔全部采用外腔式结构, 放电腔体的密封窗口采用 CaF_2 或 MgF_2 窗片, 均与光轴倾斜 4° 。放大器的全反镜中央留一半径 2 mm 的小孔, 让振荡器的光通过此孔注入到放大器中。振荡器输出的激光脉宽约 20 ns, 注入放大器后可在 2~ 3 个来回振荡中得到增益放大。为了在放大器中充分利用激活介质, 最终得到衍射输出, 放大器的输出镜中央镀小直径全反膜, 其半径 a_1 满足

$$a_1 = a_2/M \quad (7)$$

其中放大器全反镜有效通光孔径的半径 $a_2 = 15$ mm, 谐振腔的放大率 M 近似取: $M = |R_2/R_1| = 2606/300 = 8.69$ 。代入(7)式得到: $a_1 = 1.73$ mm。考虑到放大器的放电特性, 希望得到较高的增益, 实际取 $a_1 = 2.0$ mm。

当振荡器以 1 mJ 的光强注入放大器时, 获得的系统放大倍数约为 50, 随着种子光强的增加, 放大器的增益下降。此时, 增益系数 a 可由下式求出:

$$G = \exp(-aL) \quad (8)$$

此处取放大倍数 $G = 50$, $L = 100.3$ cm, 可求得 $a = -0.039$ cm^{-1} 。增益系数 a 与粒子数 Δn 成正比, 故可求得在最佳增益时的反转粒子数密度:

$$\Delta n = (8\pi\nu^2/c^2)\alpha\tau\Delta\nu \quad (9)$$

式中 c 为光速; ν 为跃迁频率; τ 为上能级自发辐射寿命; $\Delta\nu$ 为线宽。得振荡放大系统的饱和光强 I_s 为^[8]:

$$I_s = 8\pi h\nu\tau\Delta\nu/\lambda^2\tau \quad (10)$$

式中 h 为普朗克常数, τ 表示自发辐射反转寿命, λ 为激光波长。

3 ArF 准分子激光振荡放大的实验

ArF 准分子激光振荡放大系统的光路设计如图 2 所示。两个独立的激光器件分别作为振荡器和放大器, 且均采用外腔式结构。振荡级由紫外光栅、 L_1 和 L_2 组成的 5 倍扩束镜以及平面输出镜构成。由紫外光栅调谐输出的激光束, 作为种子光源, 经两个平面反射镜反射后耦合入放大器。放大器的全反镜 $R = 2606 \text{ mm}$, 中央开一 $\Phi 4$ 的小孔, 供注入光通过。其输出耦合镜焦距 $f = 300 \text{ mm}$, 中央镀一 $\Phi 4$ 的全反膜。放大器采用虚共焦非稳腔结构, 有效地改善了激光的光束质量, 同时放大了振荡器注入的激光能量。为了减少光学损耗, 所有的光学元件(密封窗片, 扩束系统等)均对 193 nm 镀介质增透膜。器件的全反镜采用镀铝膜。

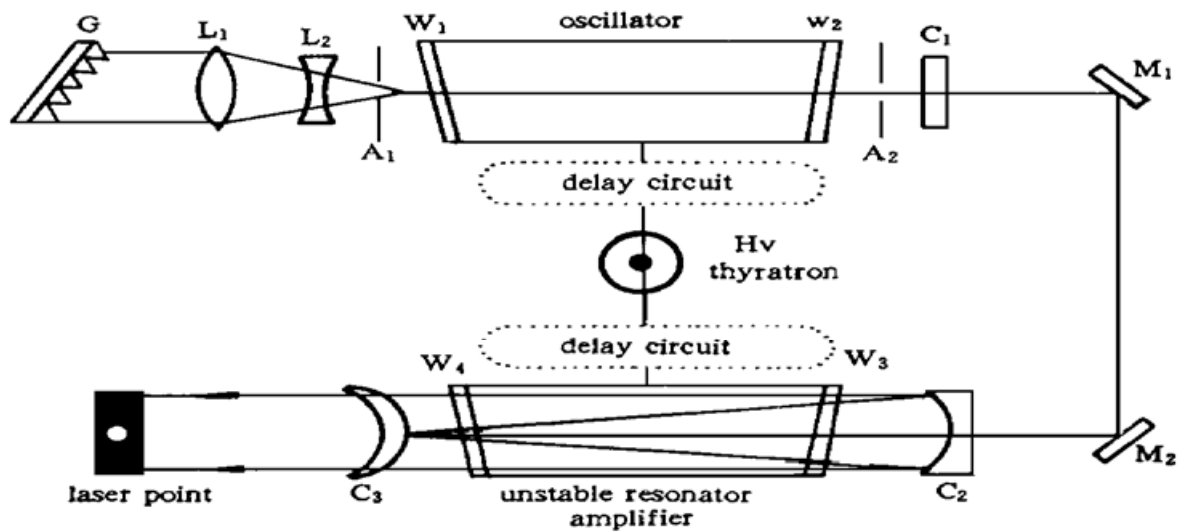


Fig. 2 Optical scheme of ArF excimer laser system of oscillator and amplifier

G: UV grating; L_1 : objective lens; L_2 : eye lens; A_1 , A_2 : apertures; W_1 , W_2 , W_3 , W_4 : CaF_2 or MgF_2 windows; M_1 , M_2 : plane total reflectors; C_1 : plane mirror of the oscillator; C_2 : mirror of the unstable cavity; C_3 : couple lens of the unstable cavity

首先对组成 ArF 准分子激光振荡放大系统的振荡器和放大器分别进行单独调试, 每台器件以 ArF 准分子激光运转正常后再进行振荡放大联调。器件的放电均匀性是保证整个系统正常运转的前提, 而快放电激励的 ArF 准分子激光体系容易引起弧光放电, 作者对器件的结构, 电极面型和预电离方式, 及工作气体的配比都进行了系列研究, 取得了较好的结果。详细工作另文叙述。

ArF 准分子激光振荡放大系统的光路调整首先用 He-Ne 激光和平行光管分别对振荡器和放大器逐个调整光路, 使单台器件以 ArF 激光运转正常, 然后将两台器件光路串联起来。由于准分子激光的放电轴和光轴正交, 且 ArF 激光和 He-Ne 激光的波长相差甚远, 光路的调整还受到几何尺寸等诸多因素的限制。在激光器的实际运转过程中, 最终需将振荡器和放大器的光路调整到完全重合是一件十分细致、繁琐的工作。

与 YAG 激光振荡放大系统不同的是, ArF 准分子激光振荡放大系统的放大器自身具有谐振腔, 且增益较高, 当高压放电时, 可以独立形成激光振荡。而在振荡放大系统中, 必须避免放大器的自身激光振荡。理想的状况是, 当振荡级的种子光注入放大器时, 放大器正处于增益最大。因而, 准分子激光振荡放大系统的时间匹配是十分重要的。在正常充放电网络运

转时, ArF 激光的光脉宽仅 20 ns, 而振荡器输出口至放大级注入口的几何光程约 1 m。根据测量结果, 振荡器比放大器独立激光振荡的时间滞后约 10 ns 左右。如果要得到激光振荡放大效果, 首先必须克服器件的自身抖动, 并且适当延迟放大器的放电时间, 使振荡器的输入信号尽可能落在放大器的增益脉宽里。本文使用一只国产闸流管(4060)作为开关元件, 同时驱动两台充放电回路并联的 ArF 准分子激光器件, 较好地解决了振荡器和放大器之间的时间抖动。同时采取两个措施使振荡器和放大器的振荡时间得到匹配: 1) 减小振荡器的储能电容 C_s , 使 C_s 振荡与 C_s 放大之比约等于 4/5; 2) 在放大器的主电路上加延时电感(根据实验确定电感量)。最终使该系统获得了良好的振荡放大效果。

采用国产 1200 l/mm 的紫外光栅调谐 ArF 激光谱线, 由于受测量条件的限制, 没有测量光谱的调谐范围。光栅的调谐采用手动和单板机控制两种方法, 步进的速度和数值可预设, 为使用者提供了方便。

由于 ArF 激光的工作介质氟气的活性较大, 事先用氟施主气体反复对器件腔体和储气筒进行钝化处理。为了安全起见, 氟气用高纯氦气按 $F_2 \cdot He = 1 \cdot 19$ 稀释。氟气的纯度极为重要, 直接影响激光的能量和寿命, 通常利用冷阱提纯氟气。如果混合气体中的氟含量过高, 将使器件产生弧光放电, 引起激光输出不稳定。在本文的实验条件下, ArF 准分子激光器较好运转时, 总气压为 0.3 MPa。气体的配比为: $F_2/Ar/He = 3.0 \text{ kPa}/30.0 \text{ kPa}/0.258 \text{ MPa}$ 。

4 实验结果

本文对 ArF 准分子激光单台器件和振荡放大系统分别进行调试, 每台器件以 ArF 准分子激光运转正常后再进行振荡放大联调, 实验结果如下所述。

当单台器件以 ArF 准分子激光(193 nm)运转时: 单脉冲能量达 100 mJ; 激光脉冲宽度 20 ns; 工作频率分手动单次和 1~10 Hz 运转; 单次充气寿命 $> 10^5$ pulses; 脉冲能量输出不稳定

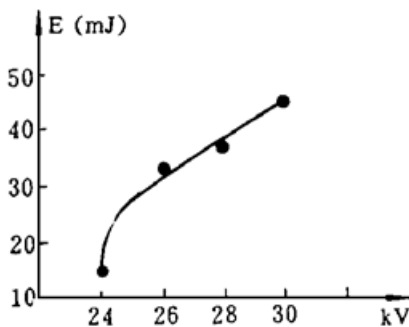


Fig. 3 The relation curve between working voltage and energy of ArF excimer laser system of oscillator and amplifier

性约 5%; 激光光斑 $8 \times 20 \text{ mm}^2$; 光束发散角 $4.5 \times 2.5 \text{ mrad}$ 。

当两台器件联调后以 ArF 准分子激光振荡放大系统(193 nm)运转时: 单脉冲能量 50 mJ; 激光脉冲宽度 20 ns; 激光谱线调谐宽度: 192.9~193.7 nm; 单次充气寿命 $> 10^5$ pulses; 激光能量不稳定性约 5%; 光束发散角 $< 0.20 \text{ mrad}$; 工作频率分手动单次和 1~10 Hz 运转。

图 3 示出了 ArF 准分子激光振荡放大系统的激光能量与工作电压的关系曲线。在本文的实验中, 振荡放大系统的放大倍数约 50 倍。

结束语 本文研究了 ArF 准分子激光振荡放大系统的运转, 中心波长 193 nm, 系统的单脉冲能量 50 mJ; 激光脉冲宽度 20 ns; 激光谱线调谐宽度: 192.9~193.7 nm; 激光能量不稳定性约 5%; 光束发散角 $< 0.20 \text{ mrad}$, 显著地改善了单台器件的光束质量; 振荡放大倍数达到约 50 倍, 对于我国的科学研究具有积极的作用。

由于国产元器件(如闸流管,紫外光栅等)的性能较差,影响了整个系统的性能,此外,国内真空紫外的光学材料透过率较低,氟气的纯度不高等因素都是进一步开展真空紫外工作必须解决的问题。

参 考 文 献

- [1] 马树森, 胡雪金, 姚永邦等, 紫外可调频准分子激光系统. 中国激光, 1986, **11**(7): 389~ 392
- [2] 向世清, 楼祺洪, 叶震寰等, 一体化 XeCl 准分子激光振荡-放大系统. 中国激光, 1994, **21**(11): 869~ 874
- [3] 成序三, 王润文, 高重复频率、高平均功率、窄线宽 KrF 准分子激光器的研究. 光学学报, 1992, **12**(6): 511~ 515
- [4] I. J. Bigio, M. Slatkine, Attainment of the theoretical minimum input power for injection locking of an unstable-resonator KrF laser. *Opt. Lett.*, 1981, **6**(7): 236~ 238
- [5] C. Skordoulis, S. Spyrou, A. C. Cefalas, Gain and saturation measurements in a discharge excited F₂ laser using an oscillator amplifier configuration. *Appl. Phys.*, 1990, **B51**(2): 141~ 145
- [6] Lambda Physics, Oscillator Amplifier Excimer Laser LPX150, 250 & 350, Printed 05/1991
- [7] 赵震声, 胡雪金, 沈德立等, 非稳腔运转的准分子激光器, 量子电子学, 1989, **6**(1): 27~ 28
- [8] A. 亚里夫著, 刘颂豪, 吴存恺, 王明常译, 量子电子学, 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 150~ 153

Researching on ArF Oscillator Amplifier Excimer Laser

Zhao Zhensheng Chen Yongrong Hu Xuejin Gu Huaimin

Xi Juxiong Zhang Hu Yuan Tinghai Kuang Mei

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Yao Jianquan Wu Feng Shi Xiangchun

(Institute of Laser and Photon-Electron Technology, Tianjin University, Tianjin, 300072)

(Received 1 February 1996; revised 12 August 1996)

Abstract An ArF oscillator amplifier excimer laser was developed. Using a thyatron as a switch, discharge jitter of the laser system was effectively overcome through matching main charge and discharge circuits. It was achieved that amplify index 50 of the system, pulse energy 50 mJ, and a beam divergence lower than 0.20 mrad.

Key words ArF excimer laser, oscillator, amplifier.