

ArF 准分子激光器的窄线宽可调谐 运转及注入放大

王 杰 吴 峰 施翔春 肖绪辉 姚建铨

(天津大学精密仪器与光电工程学院激光与光电子研究所 天津 300072)

提要 在一台快放电泵浦的 ArF 准分子激光振荡放大系统的振荡级上采用光栅、扩束镜、光阑等腔内元件,用组合输出镜获得了线宽小于 0.1 nm,调谐范围~ 1 nm 的激光输出。注入到非稳腔结构的放大级,注入后放大级效率提高了约 50%,获得了平均 30 mJ/脉冲的高光束质量的窄线宽可调谐激光,最大单脉冲能量> 50 mJ,并进行了氧气的吸收光谱实验。

关键词 ArF 准分子激光器,窄线宽,可调谐,注入放大

真空紫外 ArF 准分子激光由于光子能量大(6.43 eV),峰值功率高,被广泛地用于研究物质特性、进行半导体诱导掺杂、激光诱导化学气相沉积、工业加工等方面。近年来,利用 ArF 激光的瑞利散射和氧气的基态以及振动激发态在 193 nm 附近吸收发射荧光,用于对复杂高速空气流场的瞬态实时无干扰测量^[1,2],引起航空航天界的重视。在许多情况下,需要窄线宽和可调谐运转^[2]。本文的背景是要研制一台满足测速要求的窄线宽可调谐 ArF 激光光源。自从准分子激光器诞生以来,准分子激光器得到了飞速发展,已经形成系列产品,但在国内较高功率输出的窄线宽可调谐 ArF 准分子激光器很少报道。1984 年成序三等人报道了对 XeCl 激光的线宽进行压缩,得到线宽~ 0.001 nm,2 mJ/脉冲的激光输出^[3]。后来又对进口 KrF 准分子振动放大系统进行了改造,获得了窄线宽运转^[4]。我们在一台 1995 年中国科学院安徽光机所研制的 ArF 准分子激光振动放大系统上^[5],利用光栅、扩束镜、光阑等腔内元件,并用组合输出镜得到了线宽小于 0.1 nm,调谐范围~ 1 nm 的激光稳定运转,注入到放大级获得了平均 30 mJ/脉冲的高光束质量的窄线宽可调谐激光,激光发散全角为 0.08×0.2 mrad,最大单脉冲能量> 50 mJ,实现了连续调谐和稳定运转,满足了实用要求。

1 实验装置

中国科学院安徽光机所研制的 ArF 准分子激光振动放大系统,采用紫外预电离快放电泵浦,充气比例为 $F_2/Ar/He = 0.1\%/5.5\%/94.4\%$,总气压为 3 atm,放电电压为 30.0 kV,腔内加透紫外石英制 5 倍扩束镜自由振荡输出单脉冲能量~ 5 mJ。注入~ 1 mJ 能量到非稳腔结构的放大级得到平均每脉冲~ 55 mJ 的高光束质量的激光输出,脉宽为 20 ns。

我们采用紫外反射光栅代替全反镜, 激光通过扩束后照在光栅上, 通过转动光栅进行调谐, 光栅为 3600 线/mm, 闪耀波长为 240 nm, 闪耀角为 25.35° , 衍射效率~ 45%。经计算在 193 nm 处的闪耀角为 20.33° , 衍射效率~ 40% 左右, 腔内加两只 $\phi 8$ 的小孔光阑。两种输出耦合镜为未镀膜的透紫外石英平片和组合镜。组合镜由全反镜和起分光作用的透紫外石英平板组成, 通过改变平板的倾斜角度来改变输出损耗以代替部分反射率输出镜, 输出通过有 $\phi 4$ 小孔的全反镜注入放大级。采用组合镜输出的装置如图 1 所示。

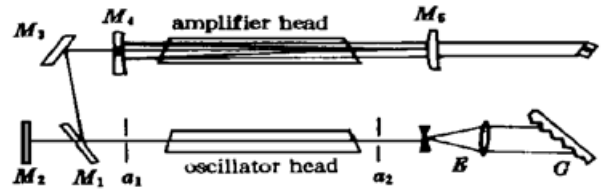


图 1 实验装置图

a_1, a_2 : 小孔光阑 $\phi 8$ mm; G : 光栅; E : 扩束镜; M_1 : 透紫外石英平片; M_2, M_3 : 平面全反镜; M_4 : 中心带 $\phi 4$ 小孔的凹面全反镜, $R = 3000$ mm; M_5 : 中心镀 $\phi 4$ 全反膜的凸透镜, $R = 600$ mm

Fig. 1 Diagram of the oscillator-amplifier system of the ArF excimer laser

M_2, M_3 : HR mirrors; M_4 : HR mirror with a little hole in the center; M_5 : output mirror with a small area HR in the center; M_1 : beam splitter; a_1, a_2 : shutters; F : beam expander; G : grating

2 实验结果

自由运转的 ArF 激光中心波长约为 193.4 nm, 线宽~ 1 nm, 由于空气中氧气 Schumann-Runge(4, 0) 带的强烈吸收(见表 1), 一般输出谱线有对应的凹陷, 如文献[6]所示。

表 1 氧分子 Schumann-Runge 带光谱(4, 0)

Table 1 Oxygen Schumann-Runge (4, 0) bands

spectrum	wavelength (nm)	spectrum	wavelength (nm)	spectrum	wavelength (nm)
$P(13)$	192.9553	$P(21)$	193.6706	$R(19)$	193.2252
$P(15)$	193.1086	$R(15)$	192.9235	$R(21)$	193.3979
$P(17)$	193.2795	$R(17)$	193.0666	$R(23)$	193.5836
$P(19)$	193.4671				

我们在腔内加两只 $\phi 8$ 小孔光阑, 5 倍扩束望远镜, 光栅利用一级衍射光谱, 腔长为 1.2 m, 构成一个 Hansch 腔, 单程线宽可由下式计算

$$\Delta\lambda = \Delta\alpha \partial\lambda / \partial\alpha \quad (1)$$

$\Delta\alpha$ 为经过扩束镜后的腔内激光发散角, $\Delta\lambda$ 为单程线宽, $\partial\lambda / \partial\alpha$ 为光栅色散率倒数。

由于腔长较长, 我们用输出发散角代替扩束镜前的腔内激光发散角, 测得输出发散角为 1.2 mrad, 扩束镜为 5 倍, $\Delta\alpha \approx 0.24$ mrad, 光栅色散率倒数 $\partial\lambda / \partial\alpha = 0.52$ nm/mrad, 计算单程线宽~ 0.12 nm。由于腔内激光多次往返(脉宽~ 20 ns), 实际线宽要小于单程线宽。通过调谐光栅得到 ArF 激光的调谐输出曲线。调谐步长 0.0414 mrad(通过精密光栅调谐机构)相当中心波长移动 0.021 nm, 得到包含氧气吸收峰的曲线(多次平均)。我们的光栅调谐机构可以精确地测出吸收峰的间隔, 和氧气的吸收光谱进行比较标定, 由于吸收谱线间距是不相等的, 可利用误差最小及 ArF 荧光光谱轮廓定出激光波长的绝对位置, 图 2 是测出并对吸收峰位置进行标定的曲线, 很精确地与文献[6]吻合。图 2 中两吸收峰最小间隔~ 0.11 nm, 考虑到吸收峰宽度(包含 P, R 两支吸收谱), 估算激光器的线宽应小于 0.1 nm。调谐过程光栅转动 2.1 mrad, 计算中心波长移动~ 1 nm, 与 ArF 激光增益线宽吻合。

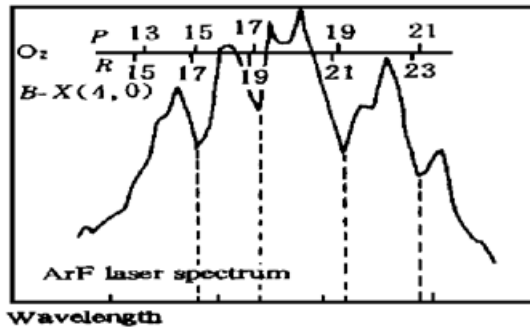


图 2 ArF 激光输出调谐曲线

Fig. 2 The output energy curve of the ArF laser

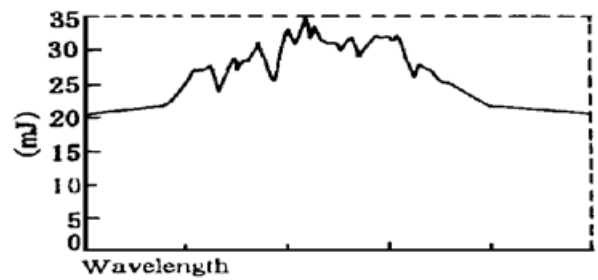


图 3 注入后 ArF 激光输出调谐曲线

Fig. 3 The output curve after injection

振荡级产生可调谐的窄线宽激光注入到非稳腔结构的放大级,利用同一个闸流管和外电路解决了放电同步和延迟问题。注入能量 $\sim 100 \mu\text{J}$,图 3 是注入后调谐振荡级测得的放大级的输出能量曲线(同一点多次平均),未注入时放大级输出能量约 20 mJ/脉冲,注入后效率提高了约 50% 以上,平均输出能量达 30 mJ/脉冲(使用 NJ-J1 型激光能量计)。利用 WDG-500-1A 型单色仪测三级光谱输出线宽,未注入时,线宽 $\sim 1.2 \text{ nm}$ 。注入后线宽 $\sim 0.1 \text{ nm}$ (单色仪分辨率限制),调谐范围为 1.1 nm。输出为空心矩形光束,全发散角为 $0.08 \times 0.2 \text{ mrad}$ 。如果振荡腔内加入标准具,可以得到更窄的线宽,满足滤波瑞利散射对 ArF 激光器的要求。

致谢 感谢中国科学院安徽光机所赵振声同志及科研组对 ArF 准分子振动放大系统的研制。

参 考 文 献

- 1 R. Miles, W. Lempert. Two-dimensional measurement of density, velocity and temperature in turbulent high-speed air flows by UV rayleigh scattering. *Appl. Phys. B*, 1990, **51**(1) : 1~ 7
- 2 R. Miles, C. Cohen, J. Connors *et al.*. Velocity measurement by vibrational tagging and fluorescent probing of oxygen. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11) : 861~ 863
- 3 成序三,楼祺洪,郑承恩等. Blumlein 放电长脉冲 XeCl 激光器的窄线宽输出. *中国激光*, 1985, **13**(1) : 36
- 4 成序三,王润文. 高平均功率窄线宽 KrF 准分子激光系统的研究. *光学学报*, 1992, **12**(6) : 511~ 515
- 5 赵振声. ArF 准分子激光振荡放大系统通过国家鉴定. *光电子技术与信息*, 1996, **9**(1) : 46
- 6 J. J. Ewing. Excimer laser, *Laser Hand Book*, edited by ML. STTTCH, 1979, **3** : 192

On Tunable, Narrow Spectral Width Operation of a KrF Laser and Injected Amplification

Wang Jie Wu Feng Shi Xiangchun Xiao Xuhui Yao Jianquan

(College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract We obtain a spectral width less than 0.1 nm and a tunability about 1 nm by adding a grating, a beam expander, shutters and a combining lens in the oscillator of a discharge pumped ArF laser oscillator-amplifier system. The output power is injected into the amplifier that produces an average energy of 30 mJ/pulse, and the tunable, narrow spectral, and very low beam divergence laser output. The efficiency is increased about 50 percent after injection. A peak output of more than 50 mJ/pulse is achieved. The O_2 absorption of the ArF laser is also measured.

Key words ArF excimer laser, narrow spectral width, tunable, injection amplification