

1.3 J XeCl 激光器的注入锁定

成序三 楼祺洪 王润文
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

报道了 1.36J 单脉冲能量的水传输线充电、轨道开关主放电 XeCl 激光器非稳腔注入锁定。注入锁定激光输出功率 18 MW、线宽 $8.9 \times 10^{-3} \text{ \AA}$ 、空间发散角 0.2 mrad。讨论了 XeCl 激光器注入锁定的一些参量以及放电同步特性。

一、引 言

准分子带宽一般在 10 \AA 以上, 只用一台器件难于获得窄谱线的高功率输出。而激光化学、同位素分离和非线性光学等方面的应用不但要求功率高而且要求谱线窄 ($\leq 10^{-2} \text{ \AA}$)^[1, 2]。目前实现窄谱线高功率输出的最有效方法是注入锁定, 即用一束低功率、窄线宽、空间相干性好的激光注入一台高功率振荡器以控制其光谱和空间发散角。

准分子激光器注入锁定已有一些文献报道^[3~5]。本文首次采用 X 光预电离、水传输线充电、多通道轨道开关主放电泵浦的振荡器, 运用一种新颖的电路实现放电同步来进行 XeCl 注入锁定, 旨在把注入锁定窄线宽输出功率进一步提高。在不同光腔结构的情况下, 对振荡器输出光束特性也进行了比较。

二、注入锁定实验装置

图 1 是激光注入锁定装置。注入源是一台紫外预电离 XeCl 激光器, F_1 、 F_2 、 F_3 为标准具, D_1 、 D_2 为光阑, M_{10} 、 M_{20} 为耦合腔镜。振荡器为 X 光预电离器件, M_1 、 M_2 构成正枝共焦非稳腔, F 为一块薄石英平板, 用于密封中心钻有 5 mm 直径注入孔的 M_1 腔片, D 为注入孔。关于注入源和振荡器装置的详细情况, 参阅文献[6, 7]。

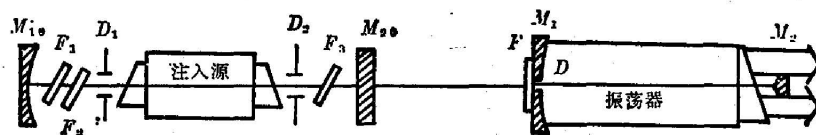


图 1 注入锁定光学装置图

Fig. 1 Schematic of the optical setup used for injection locking

1. 注入源

为压窄线宽, 注入源腔内插入反射率 75%、厚 0.1 mm、0.2 mm 的 F_1 、 F_2 和反射率

90%、厚 1 mm 的 F_2 三块标准具, 并采用直径 $d=3$ mm 的两个小孔准直, 得到 8.9×10^{-8} Å 线宽, 0.15 m rad 空间衍射极限发散角, 25 ns 脉宽 (FWHM), 单脉冲最大能量 200 μJ、峰值功率 8 kW 的激光输出。

作为准分子激光注入源, 只要求输出功率略高于振荡器单模自发辐射功率就可实现注入锁定^[8]。本实验采用的 X 光预电离振荡器、XeCl 带宽 $\Delta\lambda \approx 10$ Å, 增益介质长 $L=60$ cm, 有效孔径 $D^2 \approx 10$ cm², 经理论计算等价自发辐射噪声信号为 10 W/cm² 左右^[8]。所以 8 kW 的注入信号功率足以很好地锁定振荡器。

2. 振荡器

振荡器采用半外腔式正支共焦型非稳腔。用非稳腔的目的是为了改善光束方向性和降低注入锁定的注入阈值功率^[8]。

注入端为曲率半径 $R_1=300$ cm 全反射凹面镜, 有效反射孔径 $a_1=4$ cm, 腔镜即放电室窗口。输出端采用环状输出耦合, 放电室窗口石英板两面镀增透膜, 总反射率小于 2%, 窗口倾斜于轴线 3° 以上。输出端耦合镜为一个有效孔径 $a_2=0.8$ cm 的凸面全反射镜, 曲率半径 $R_2=-90$ cm。共焦腔腔长满足 $L=105$ cm $\pm \Delta L \approx f_1+f_2$, $f_1=R_1/2$, $f_2=R_2/2$ 。改变腔长 $\Delta L \approx 0.5$ cm 是为了调整腔等价非涅尔数 N_{eq} 来调整腔损耗以达到注入光束与非稳腔膜匹配, 使注入阈值功率下降到尽量的小。该腔的等价非涅尔数:

$$N_{eq} = \frac{a_2^2}{4\lambda L} \left[\frac{g_2}{g_1} (g_1 g_2 - 1) \right]^{\frac{1}{2}} \approx 53,$$

其中 $g_1 = 1 - \frac{R_1}{2L} = \frac{2}{3}$, $g_2 = 1 - \frac{R_2}{2L} = 2.2$ 。该非稳腔的放大倍率 $M = -\frac{R_1}{R_2} = 3$ 。

如图 1 所示, 注入光是通过凹面镜中心钻一个小圆孔注入, 在镜后壁粘一块厚 1 mm 石英平板密封, 小孔直径 d 为 5 mm。因为 d 大于注入光束截面 (0.25~0.3 cm), 所以注入光束的注入损耗只有石英平板的反射损耗 (约 10%)。又由于注入光束发散角接近衍射极限分布, 能够较好地控制主振荡器输出光束空间发散角。注入小孔引起的振荡器输出能量损耗小于总激光能量的 10%。

3. 两台器件主放电的同步

注入光脉冲宽度 (FWHM) 25 ns, 振荡器激光上升前沿 10~20 ns, 脉宽 70 ns, 要实现注入锁定, 注入光与振荡器增益时间的延迟时间分散性 $\Delta\tau$, 必须小于 20 ns, 也即要求两台器件的主放电延时分散性 $\Delta\tau$, 小于 20 ns。本文实现高能量的注入锁定, 在电路上主要有如下一些改进:

(1) 一般准分子激光注入锁定, 注入源、振荡器均采用较对称的快放电电路, 便于实现两台器件主放电同步。但快放电电路激光能量一般难于提高 (<1 J 输出)。本文采用水传输线充电, 通道开关主放电的振荡器主放电结构, 激光输出能量在 1 J 以上。由于水传输线充电是一个三角波, 有 1 μs 左右的长充电时间, 用触发器或电缆延时, 都很难控制两台器件主放电延时的分散性。由于我们解决了这种放电装置的同步问题, 实现了单脉冲 1.36 J 能量的 XeCl 注入锁定输出, 这是迄今为止我们所知的 XeCl 激光注入锁定最高单脉冲能量的报道。

(2) 为减小抖动, 注入源主放电球隙采用低电感三间隙场畸变球隙, 用前沿小于 5 ns、

电压高于 30 kV 的信号触发, 击穿时间抖动小于 2 ns。调整振荡器多通道轨道开关充气气压和电极间距, 控制其击穿抖动时间小于 15 ns。

(3) 从振荡器主放电通道开关前面取出一个 60 kV 峰值、1 μ s 脉宽的三角波电压信号, 经 RC 电路延时后, 再通过一个作为整形器的低电感、小电极间距、充以高压氮气的球隙把 1 μ s 前沿的充电三角波变换为一个 5 ns 前沿、峰值在 30 kV 以上的陡的触发信号, 去触发注入源主放电三电极球隙。调节 RC 回路电阻和电容, 或调节整形器的击穿电压, 均可调节注入源-主放电延时。采用这种自耦合触发回路, 注入源-振荡器主放电延时分散性小于 20 ns, 延时可在 400 ns 范围连续可调。关于这种电路的理论分析和实验结果, 另有文章详细报道^[9]。

三、实验结果与讨论

1. 光谱特性

在注入源压缩线宽选单线时, 曾在腔内置 0.1 mm、0.2 mm、1 mm 三块石英标准具实现了 0-0(3077.04 \AA)、0-1(3079.61 \AA)、0-2(3082.10 \AA) 三条振动跃迁谱的单线运转^[7]。这里除 0-0(3077.04 \AA) 线外, 注入锁定实现了 0-1、0-2 两条跃迁谱单线运转。偏离 0-1、0-2 两条最强跃迁的 0-0 线的注入, 由于 0-1、0-2 线的竞争, 没有实现好的单线注入锁定。实验中振荡器用水传输线主放电结构, 脉宽较宽(稳腔可达 100 ns), 偏离增益中心的谱线注入, 在激光后期强跃迁线的竞争把振荡器拉回到了增益谱中心的 0-1、0-2 线, 把谱线展宽。

锁定光线宽 $8.9 \times 10^{-3} \text{\AA}$, 没有发现相对注入光线宽的展宽。图 2 为注入锁定输出光的干涉环, 由此环可决定线宽^[7]。

设自由振荡为 16 \AA 线宽。注入锁定线宽窄化比为 $16 \text{\AA} : 8.9 \times 10^{-3} \text{\AA} \approx 1.8 \times 10^3$ 。



图 2 注入锁定输出激光的干涉环
Fig. 2 Interference rings of injection-locked laser

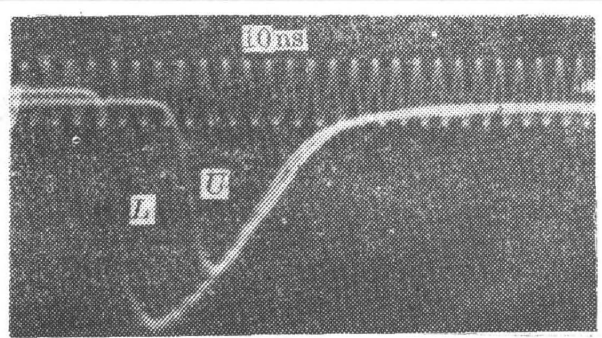


图 3 锁定与不锁定的激光波形
Fig. 3 Temporal shapes of laser pulses
L—Injection-locked; U—Unlocked XeCl (Time scale: 10 ns)

2. 能量特性

在同一实验条件下(振荡器放电室充气总压为 4.8 atm, 主放电储能电容充电 40 kV^[9], 以 X-光预电离振荡器输出的激光单脉冲最大能量, 对稳腔为 1.4 J, 对非稳腔, 没有注入信号时为 1.12 J, 注入锁定后为 1.36 J。多次激光取平均值, 对非稳腔, 注入锁定比自由振荡能量提高 25%。图 3 是锁定和非锁定的非稳腔输出激光波形。无信号注入时, 振荡器以自

发辐射中要用 30 ns 以上时间来建立振荡, 用较强的信号(8 kW)注入时, 振荡器直接由注入信号起振, 激光振荡提前 20 ns 以上。充分利用了振荡器增益, 提高了输出能量。由图可知非稳腔注入锁定脉宽达 75 ns(FWHM), 不锁定脉宽为 50 ns, 锁定最高输出功率 18 MW(1.36 J, 75 ns)。

因振荡器放电室注入孔用厚 1 mm 的石英板密封, 不宜充气压过高。一般情况下振荡器工作总气压为 3.2 atm, 主放电储能电容充 35 kV 电压, 注入锁定输出功率 11 MW(800 mJ, 70 ns)。

注入源窄线宽输出最大功率可达 8 kW, 逐渐衰减注入光强, 测得能够锁定非稳腔的注入功率阈值为 1 kW。振荡器用稳定腔($R_1=3\text{ m}$, $R_2=\infty$, $L=1.1\text{ m}$)时, 8 kW 的光注入还未实现注入锁定, 估计对稳腔要实现锁定, 注入功率还要提高一个量级(>80 kW)。

3. 光束空间相干性

在 $4 \times 2.5\text{ cm}^2$ 输出光束截面的 X-光预电离大体积放电准分子振荡器上, 对比了各种腔结构输出光束的空间相干特性。

使用稳定腔($R_1=3\text{ m}$, $R_2=\infty$, $L=1.1\text{ m}$), 输出能量比非稳腔不注入锁定时约高 30%, 但空间发散角大于 10 mrad。采用接近临界 F-P 腔的结构($R_1=20\text{ m}$, $R_2=\infty$, $L=1\text{ m}$), 光束发散角降低到 2 mrad, 输出能量也比相同情况下稳腔结构约高 5~10%。

采用图 1 非稳腔, 光束发散角减小到 0.5 mrad, 但输出能量降低。如果采用非稳腔注入锁定, 输出能量与稳腔相当, 光束发散角减小到 0.4 mrad 以下, 聚焦打在照相纸上的光斑比不注入锁定非稳腔时更均匀。

为了较精确地测定非稳腔输出光束发散角, 采用通常焦斑法, 在 $f=2\text{ m}$ 焦距的透镜的焦面上放一系列不同孔径圆孔, 让激光聚焦通过圆孔, 在孔后测定能量。对非稳腔, 注入锁定时约 80% 的激光能量进入 1.2 mm 直径的小圆孔, 对不锁定情况只有 65% 的能量通过。当小孔直径减小到 0.8 mm 时, 约有 48% 的注入锁定激光通过小孔, 但只有 30% 的非锁定激光能量通过。这说明在 0.2 mrad 空间发散角(半角宽)内集中了一半左右的激光能量。

XeCl 激光器非稳腔注入锁定的主要结果以及与其它腔结构的结果的比较列于表 1。

表 1 各种腔结构激光输出特性比较

Table 1 Laser output characteristics of various cavity configurations

	腔 长 (cm)	曲率半径(cm)		腔镜有效孔径(cm)		最 高 输出功率	最 大 单脉冲能量	激 光 脉冲宽度	空间发散 角(半宽度)
		R_1	R_2	a_1	a_2				
稳 腔	105	300	∞	4	4	16.5 MW	1.4 J	85 ns	10 mrad
临 界 腔	100	2000	∞	4	4	16.5 MW	1.4 J	85 ns	1 mrad
非 稳 腔	105	300	-90	4	0.8	18 MW	1.12 J	60 ns	0.25 mrad
非稳腔注入锁定	105	300	-90	4	0.8	18 MW	1.36 J	75 ns	0.2 mrad

参 考 文 献

- [1] E. Armandillo, D. Proch.; *Opt. Lett.*, 1983, 8, No. 10 (Oct), 523.
 [2] S. R. Leone; *Photofragment Dynamics*, (in *Advances in Chemical Physics*, 50, K. P. Lawley, ed., 1982),

155.

- [3] J. Goldhar, J. R. Murray; *Opt. Lett.*, 1977, **1**, No. 6 (Dec), 199.
- [4] J. Goldhar *et al.*; *IEEE. J. Q. E.*, 1980, **QE-16**, No. 2 (Feb), 235.
- [5] F. Kannari *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **42**, No. 9 (May), 777.
- [6] 楼祺洪等; 私人通讯。
- [7] 成序三等; 《中国激光》, 待发表。
- [8] I. J. Bigio *et al.*; *IEEE. J. Q. E.*, 1983, **QE-19**, No. 9 (Sep), 1426.
- [9] 楼祺洪等; 待发表。

Injection locking of a XeCl excimer laser with pulse output energy of 1.3 J

CHENG XUSAN LOU QIHONG AND WANG RENWEN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 31 January 1985; revised 27 April 1985)

Abstract

The injection locking of a XeCl excimer laser driven by a long transmission-line pulse-forming network was achieved with an unstable optical resonator. The injection-locked output energy was 1.36 J (18 MW in peak power) with a linewidth of $8.9 \times 10^{-3} \text{ \AA}$ and a beam divergence of 0.2 m rad. Parameters of the injection locking and synchronization characteristics of discharge are also discussed.