

# 一体化 XeCl 准分子激光振荡-放大系统

向世清 楼祺洪 叶震寰 宁东 王之江

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 采用“一体化自放大”技术, 从实验上研究了 XeCl 激光器振荡-放大一体化的特性, 获得了自放大输出的明显结果, 并分析了自放大的内在要求。结果及理论分析表明, 这种系统可适用于高增益激光系统的光束质量的改善, 并用于准分子激光器件的窄带高功率输出的获得。

**关键词** XeCl 激光器, 一体化自放大, 放大特性, 光束质量改善

## 1 引 言

准分子激光器以高功率紫外光输出受到瞩目, 但是由于其输出特性较差的相干性和窄的光脉冲长度范围, 极大地限制了它在某些领域的应用, 例如用它作光源研究后向受激拉曼散射时, 要求采用高功率窄带输出。为获得窄带准分子光源, 在单器件情况下通常采用腔内加插波长损耗选择元件的方法<sup>[1,2]</sup>, 但这样的直接结果是输出能量或功率的急剧降低, 因此需要采用注入-放大(锁定)系统来同时获得高功率。而这种系统却至少采用两个以上的器件, 导致了系统的复杂性<sup>[3]</sup>。另一方面, 即使是宽带输出, 在许多情形也需要改善准分子器件的光束方向性和均匀性, 而改善方法现仍在进行广泛研究。

为研究光束特性的改善以及探索高功率窄带输出的可能, 本文采用“一体化自放大”技术, 将单一准分子器件内的放电介质通过合适的光路安排分为两部分: 一部分用以构成振荡源, 输出窄带或宽带光束作为信号光; 另一部分则用作放大器。这里“自放大”的含义是自振荡源产生的信号光束反射回器件本身放大。因为仅有一个放电腔, 只需一个放电系统, 所以这单一放电器件自身就构成一个振荡-放大系统。本文报道我们从实验上研究其宽带输出特性及初步的窄带输出特性的结果。

“一体化自放大”方式曾少量地被运用于准分子器件<sup>[4,5]</sup>, 在其它类器件上国内外尚未有过报道。而[4,5]中也仅就整个器件的最后能量输出做过研究, 并未探讨其自放大的特性和影响因素, 对此技术概念也未明确提出和重点讨论, 且与本文目的和手段均不同。因此本文的研究有很大的必要性。

## 2 实验装置、方法及难点

实验系统主体的基本安排和光路如图 1 所示。其中 LDC (Discharge Chamber) 示出激光器

放电腔,该激光器为 X 光预电离、放电泵浦横向流动的 XeCl 激光器,放电体积为  $2 \times 2.5 \times 68 \text{ cm}^3$ ,放电腔体长为 108 cm,腔头直径为 30mm。装置详见文献[6]。新充气时按比例 1HCl : 25Xe : 2280Ne(总气压 3 atm),在稳腔自由振荡实验时,它的输出能量约 800 mJ,脉宽约 60 ns,激光器效率约 1%。在本实验中,取掉稳腔腔镜,在两腔头处用石英腔片(一端镀增透膜,一端普通平板)倾斜于光轴密封窗口,其余条件不变。图 1 中 AM 为振荡器光路,其谐振腔由全反平镜 1 和反射率为 36%的输出平镜 2 构成,由方孔光阑 3, 4( $1 \times 1 \text{ cm}^2$ )限定其振荡横向范围。在窄线宽输出时腔内靠近 1 和 2 处则另插入一个或几个石英 F-P 标准具以缩窄线宽(此时 2 换成反射率 80%的平镜)。5, 6, 9 全反平镜组成折反光路,使振荡器输出光再进入 BN 光路放大后经 9 由 10 聚焦在 11 处得到输出。方孔光阑 7, 8( $2 \times 1.5 \text{ cm}^2$ )用以限定 BN 放大增益空间横向范围,以避免 LDC 内振荡级和放大级间的横向重叠干扰。12 是可变光阑,它按面积变化方式改变进入 BN 的信号光束尺寸和能量。13, 14 分别为 He-Ne 管、平行光管,两者结合使用校正光路及调激光腔以保证光路准确性。

在上述光路的安排下,我们通过测量振荡器的输出(图 1 中 15 处)、放大后的输出(图 1 中 11 处),然后通过对各参数的计算和比较,分析增益及饱和特性、放大前后带宽、脉宽和光束特性,综合得出一体化器件的总体特性。

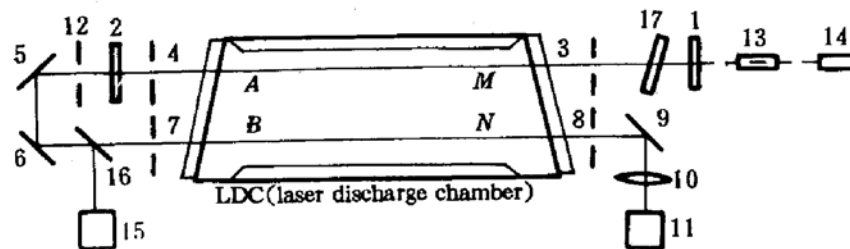


Fig. 1 Experimental setup

1, 5, 6, 9; total reflector; 2; partial reflective mirror; 3, 4, 7, 8; square beam aperture; 10; focusing lens; 11, 15; Power/Energy meter; 12; changable beam aperture; 13; He-Ne laser; 14; parallel light system; 16; beam splitter; 17; F-P etalons

在光路安排时,困难的是光学元件如何安放在口径尺寸有限的激光腔头之前而不相互影响。因为 30 mm 的腔头口径和 25 mm 的放电电极间距对一般需光学调整架的光学元件来说,尺寸无法容纳。通过将光学镜片粘在支撑杆上,支撑杆再连在调整架上使调整架外移从而解决了这个问题。

### 3 实验结果

#### 3.1 自由振荡-自放大实验

首先我们研究了宽带(自由振荡)自放大特性。在 AM 光路中,如果不加入任何波长损耗元件,振荡器将输出自由振荡的宽带激光束,以此作为信号光经反射后通过放大光路 BN,在 15 和 11 处测量放大前后的相应参数,即可分析得到宽带自放大特性。图 2 给出变化光阑 12 所获得的实验结果,图中的每一个能量值点都是在同样条件下的 30 枪激光的测量结果取数学平均所得到的,这也表明了实验结果的较好重复性。当然,在放大后的输出中 BN 光路中自发放大辐射(ASE)所给出的能量成分也包含在其中,该 ASE 能量成分在信号光被遮住时于 BN 的输出端测量其值很小,即不会对结果产生大的影响。从图 2 看来,自放大效果十分明显,而且放大中信号光面积增大引起其能量增大时饱和现象的出现也较明显。表 1 给出了放大前后

脉宽和线宽的测量结果,其中线宽按文献[2]的测量方式获得,所用的 F-P 石英标准具厚 2 mm,反射率为 80%;而脉宽则直接从宽带示波器波形测量中得出。从表 1 看出这些参数在放大前后可认为没有发生改变。

Table 1 The FWHM and linewidth characteristics of the amplifier-stage input and output

	FWHM		Linewidth	
	Input	Output	Input	Output
Free-band amplification	~40 ns	~40 ns	the same	
Narrowlinewidth amplification	~25 ns	~25 ns	0.03~0.04 nm	0.03~0.04 nm

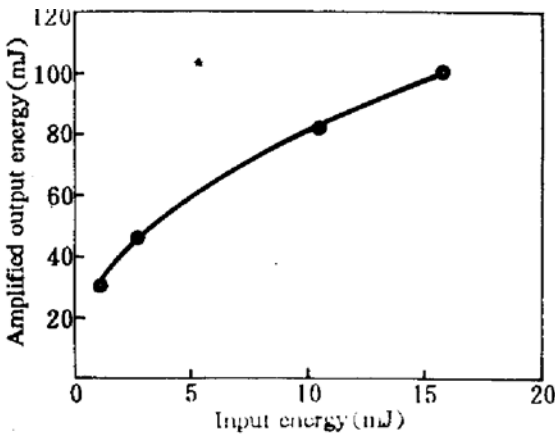


Fig. 2 The amplification characteristics of free-linewidth. The triangles denote the data of the experiment. The curve is the best fit for analysis

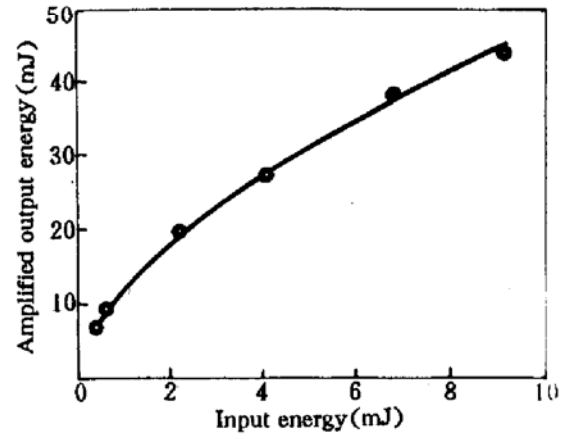


Fig. 3 The amplification characteristics of narrow-linewidth. The squares denote the experimental data. The curve is the best fit for analysis

### 3.2 窄带振荡-自放大实验

在自由振荡-自放大实验的基础上,我们初步研究了窄带的自放大特性。在 AM 中插入选频元件,AM 即成为一个窄带振荡器。实验中在全反镜 1 之前插入一块 0.2 mm 反射率为 75% 的 F-P 石英标准具来获得线宽压窄(其通光孔径为 10 mm),我们同样将其输出进行自放大,用与宽带同样的方法估测放大前后的线宽。图 3 给出了窄带的自放大实验结果,这里的数据处理方式与宽带放大情形相同。线宽和脉宽的测量结果示于表 1。由于标准具的插入,窄带较比宽带情形得到大能量或大功率的振荡输出自注入信号光要困难得多,这里我们未能获取窄带的饱和放大特性。实验结果表明,窄带的自放大的过程也十分明显,而且放大前后线宽和脉宽特性得到了相当好的保持。

Table 2 The measured output beam diameter (mm) of the oscillator-stage and the amplifier-stage

	The oscillator-stage		The amplifier-stage	
	Near-field	Far-field	Near-field	Far-field
5 mm diameter of aperture 12 in Fig. 1	5.0	5.0~5.1	~5.1	~5.1
8 mm diameter of aperture 12 in Fig. 1	8.0	8.0~8.1	~8.1	~8.1

另外,我们对振荡级输出和放大级输出的光斑进行了对比观察分析,即在图 1 中 16 处和 15 处(约距 16 处 1.8 m)、9 处和 11 处(取走 10 并约距 9 处 2 m 位置)用较好的荧光纸分别

观察了光斑的大小及均匀性。在  $l_2$  分别为 5 mm、8 mm 圆孔时,光斑在观察所能识别的范围内是光强相当均匀的圆斑,而光斑尺寸结果如表 2,需指出的是表中分别用近场和远场来代表近处和较远处的位置,这和真正的近、远场的含义稍有距离上的区别。因 AM 为平行平面腔,这种结果是必然的。由于缺乏合适的紫外光光束质量分析仪器,这里未能给出更准确的光束特性结果。但表 2 结果已足以说明,放大输出光束基本保持了振荡级的特性,即好的方向性和光斑均匀性。

## 4 分析和讨论

上面的实验结果显示了振荡-放大器件一体化的可能性。下面我们对结果进一步作出肯定的分析。

4.1 原则上讲,一体化器件自放大过程应符合普通激光放大的理论。根据放大过程的时间参数,XeCl 介质激发态寿命  $T_1$  约为 12 ns,信号光脉宽在 40 ns 以下,而放电泵浦脉宽在 250 ns 以上,这里的过程近似属于稳态放大过程;另外准分子激光介质为均匀谱线加宽,这样理论上可根据下式<sup>[8]</sup>从实验数据估算饱和光强  $I_s$ 。

$$(g_1 - \alpha)L = \ln\left(\frac{I_{out}}{I_{in}}\right) - \frac{g_1}{\alpha} \ln\left[\frac{g_1 - \alpha(1 + I_{out}/I_s)}{g_1 - \alpha(1 + I_{in}/I_s)}\right] \quad (1)$$

式中  $I$  为光强, $L$  为增益长度, $g_1 = g_0 - \gamma_0$  是有效小信号放大增益系数,而  $g_0$  为小信号增益系数, $\gamma_0$  和  $\alpha$  分别是饱和与非饱和吸收系数。因从实验测量只得到  $I_{in}$  和  $I_{out}$ ,为了由实验数据算出  $I_s$ ,我们取本激光器以前实验测得的  $g_0 = 0.18 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[10]</sup>,以及文献[7]中  $\gamma_0 = 0.02 \text{ cm}^{-1}$  和  $\alpha = 0.01 \text{ cm}^{-1}$  来估算,其中  $g_0$  值取了测得值范围内的中间值,而  $\gamma_0$  和  $\alpha$  对具体器件其值相差很小,所以取[7]中值不影响结果。由(1)式按宽带结果各数据的平均值可估算出  $I_s$  为  $1.249 \text{ MW/cm}^2$ 。估算中因实验数据是能量值,代入时先将其按脉宽和光束面积折算成平均光强值。对于窄带,因介质均匀加宽,这里粗略认为和宽带满足同样的放大特性,图 2 和图 3 拟合曲线的斜率变化大致相同证实了这一点,但由于实验中没有明显的饱和,所以没有计算窄带  $I_s$ 。

另外我们从 XeCl 介质本身来估计  $I_s$ , $I_s$  满足以下关系<sup>[8]</sup>

$$I_s = \frac{h\nu}{\sigma T_1} \quad (2)$$

这里  $\sigma$  取  $4.55 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$  为 X 光预电离下 XeCl (B-X) 跃迁的受激发射截面<sup>[9,10]</sup>。 $h$  为普朗克常数, $\nu$  为 XeCl 激光 308 nm 所对应的光频率, $T_1$  取 12 ns 以和实验条件相符。由(2)可算出  $I_s = 1.183 \text{ MW/cm}^2$ 。这样按上面两方面的估计,考虑到各方面的误差,可以认为  $I_s$  的两者结果符合得较好,因此分析从理论上定性表明了实验结果的确是自放大过程的结果。

由于准分子介质的均匀加宽和近似属于稳态放大过程,按照放大理论,信号光的线宽特性和脉宽特性是完全可以得到保持的,这与我们得到的实验结果一致。如果在 AM 内增加选频元件,线宽将会更窄,窄的程度取决于选频元件的增加情况。从这种保持特性加上前面对光束方向性和均匀性的保持的输出结果来看,如果将一体化器件也视作一个激光器,它比普通的准分子激光光束质量有显著的改善,且可简单地通过改善振荡器输出来控制最终输出,即自放大一体化技术不仅可简捷改善光束方向性和均匀性,也可方便地控制输出光束的相干性。因而自放大一体化用以改善准分子这样的高增益器件的光束特性是一可行的装置系统,因为我们只需通过易达到的改善自振荡器的光束特性就可实现系统最终的高质量且高能量(功率)的输

出。当然实验结果也已说明窄线宽时的输出能量(功率)仍受到器件放大率的限制。

4.2 一般注入-放大两级系统最关键的是同步问题,以使信号光通过正好处于增益峰值或最大粒子数反转时的放大介质。对于一体化器件,因只有一个放电腔,所以无法控制同步。信号光在振荡器内振荡时间和折反光路通过时间使其到达放大区时必然已有延迟,它在放大介质粒子数反转处于衰减时到达则放大效果不佳甚至得不到放大。这就要求放大介质增益时间要长或放电泵浦持续时间长(至少大于或等于自延迟时间与信号光脉宽之和),以及缩短上述自延迟时间(但不易达到)。准分子激光介质因为准分子寿命短,延长泵浦时间有很大局限。实验所用激光器放电泵浦持续在 250 ns 以上,上述自延迟估计约 50 ns,加上信号光本身脉宽均小于 40 ns,所以自放大仍可充分满足,实验结果充分证实了这点。但因为脉冲运转,准分子激光增益在放电时间内逐渐减小,因有一段自延迟,估计放大增益应该小于准分子激光介质可给予的最高增益。这点从前面的分析中取偏于中等的小信号增益值时结果较吻合可得到一定说明,因为 X 光预电离下  $g_0$  的值可达  $0.25 \text{ cm}^{-1}$  [10],比此处取值要大。这里的分析也说明只要满足此处的泵浦时间要求,自放大并不限于准分子器件,所以自放大技术可推广至其他类激光器件。

4.3 最后述及一下光学隔离问题。实验中,我们发现在振荡级和放大级之间没有加光学隔离元件的必要。这可如下解释:由于光束一次通过放大介质即输出而不返回,光束没有可能通过倾斜的腔头和最后的斜输出镜上的反射而部分回至振荡器。对于放大区中的 ASE,由于其特别差的方向性,可通过折反光路且受到振荡输出镜部分反射后逆向回至振荡器的部分可认为微不足道。而两级各自的严格光学同轴及两级光束由端头处光阑平行隔开使放电腔内两级之间的交互影响可避免,腔内两级的 ASE 的交互影响由于两级工作时间有先后,也不必考虑。实验中我们两级间未加隔离,具有很大的方便性。

## 5 结 论

我们从实验上研究了自放大一体化技术的自放大特性,获得了自放大输出的明显结果,并定性理论分析了自放大的机制和内在要求,结果与实验相吻合。结果及分析表明,自放大技术可适用于泵浦持续较长的任何激光器件,较易控制高增益器件获得高功率高光束质量输出,是值得广泛应用的一种实用手段。

进一步的实验和研究将通过扩束以达到高能量的窄带输出,尚在进行中。

**致谢** 感谢董景星、魏运荣、高鸿奕等同志在实验上的大力协助和支持。

## 参 考 文 献

- 1 T. J. Pacala, I. S. McDerimid, J. B. Laudenslager. Ultranarrow linewidth, magnetically switched, long pulse, xenon chloride laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(7): 658~660
- 2 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*, 1986, **13**(1): 36~40
- 3 J. Goldhar, W. R. Rapoport, J. R. Murray. An injection-locked unstable resonator rare-gas halide discharge laser of narrow linewidth and high spatial quality. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1980, **QE-16**(2): 235~241
- 4 Masakatsu Sugii, Makoto Okabe. Akio Watanabe *et al.*. Single-stage high-quality XeCl laser with a phase-conjugate Brillouin mirror. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1988, **QE-24**(11): 2264~2269
- 5 Terrence J. McKee, S. D. Hastie, R. W. Weeks. Performance of a novel injection-locked excimer laser. *J.*

- Appl. Phys.*, 1984, **56**(7): 2170~2173
- 6 楼祺洪, 郑承恩, 江 森等. 10W 横向流动准分子激光器. 中国激光, 1986, **13**(10): 635~638
- 7 R. Fedosejevs, I. V. Tomov, D. C. D. McKen *et al.*. Narrow-linewidth gain and saturation measurements of KrF discharge laser. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(10): 5629~5632
- 8 A. 亚里夫 著, 刘颂豪 等译. 量子电子学. 上海: 上海科学技术出版社, 1983. 292~303
- 9 Ch. A. Brau. Rare gas halogen excimers. in *Excimer Lasers*, edit. by Ch. K. Rhodes (Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1979), Chap. 4: 87~133
- 10 楼祺洪. 用放大自发辐射方法测量脉冲雪崩放电 XeCl 激光器的增益特性. 中国激光, 1985, **12**(9): 532~534

## An Integral XeCl Excimer Laser Device with Self Amplification

Xiang Shiqing Lou Qihong Ye Zhenhuan Ning Dong Wang Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** This paper reports the experimental studied results of an integral XeCl excimer laser device with self-amplification. The theoretical analysis about the device conditions required for the self-amplification operation is given, and the results show that this kind of device can be used widely to any high-gain laser device for obtaining high power/energy narrow-linewidth and high quality laser output.

**Key words** XeCl laser, the integral device, self-amplification, the output beam quality

## 高功率准连续掺钛蓝宝石激光器平均输出功率超过 7.5 W

高平均功率高峰值功率可调谐掺钛蓝宝石激光器很适宜作为光参量振荡器或放大器的泵浦源。我们在改进生长工艺和晶体后处理条件的基础上,生长的掺钛蓝宝石晶体质量又有了提高,制成的高功率准连续掺钛蓝宝石激光器输出有了新的提高。采用 Q 开关 Nd:YAG 内腔倍频激光泵浦,泵浦光脉冲宽度为 200 ns,激光棒的尺寸为  $4 \times 7 \times 21 \text{ mm}^3$ ,泵浦光波长 532 nm 处晶体的吸收系数  $\alpha_{532} = 1.61 \text{ cm}^{-1}$ ,品质因数  $\text{FOM} = 260$ 。在  $\lambda = 790 \text{ nm}$  中心波长附近最高输出平均功率为 7.71 W,总体转换效率(输出能量/输入能量)达 27.7%,脉冲宽度 60 ns,重复频率 5.5 kHz,峰值功率 23 kW,输出功率不稳定性为 1.8%。用两组腔片,单片石英双折射滤光片调谐时可调谐范围为 660~980 nm。

(中国科学院上海光机所八室 张 强 乔景文 邓佩珍  
天津大学精仪系 胡国绎 倪文俊 李世忱

1994 年 9 月 29 日收稿)