

# 电子束泵浦百焦耳级准分子激光实验研究

刘晶儒 袁孝 甘雨刚 赵学庆 易爱平 王晓红  
王龙华 魏燕明 邱爱慈 孙瑞蕃  
(西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘 要** 利用“闪光二号”相对论电子束加速器研制了百焦耳级 XeCl 和 KrF 准分子激光器, 激光器激活体积 24 l, 输出口径  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ , 泵浦功率密度  $1.5 \sim 2.0 \text{ MW/cm}^2$ 。XeCl 激光器最大能量 136 J, 波长 308 nm, 脉宽 50~100 ns, 峰值功率 1.5 GW, 采用虚共焦非稳腔技术, 束散角达 1.3 mrad; KrF 激光最大能量 157 J, 波长 248 nm, 脉宽 80~100 ns, 峰值功率 2 GW。

**关键词** 相对论电子束, 高功率, 氯化氙激光, 氟化氪激光。

## 1 引 言

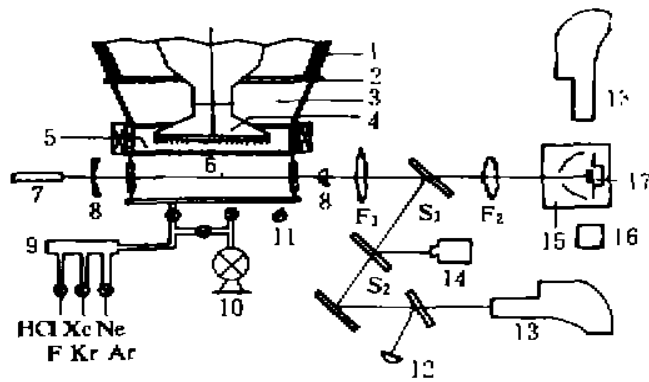
稀有气体卤化物准分子激光由于其波长短、效率高, 可在重复频率工作和可定标放大到高功率水平等优点, 在强激光技术、惯性约束聚变、紫外高亮度源及工业和医学方面具有很大的应用前景。80年代以来, 高功率准分子激光的研究有很大的进展。美、英、日、中、俄等国都先后建立了百焦耳以上的 KrF 和 XeCl 准分子激光器。

西北核技术研究所 1988 年开始进行百焦耳级准分子激光器研制工作, 1991 年 XeCl 激光器调试出光<sup>[1]</sup>, 1994 年 XeCl 激光器和 KrF 激光器达到稳定运行, 成为目前我国能量输出最大的准分子激光器。本文将介绍百焦耳级准分子激光器结构并给出实验结果。同时附表 1 说明目前世界上高功率准分子激光器的发展情况。

## 2 百焦耳级准分子激光器结构

稀有气体卤化物准分子激光介质属于非存储介质, 它具有高增益、短自发辐射寿命、较强的非饱和吸收和较低的饱和参量等特性, 因此, 欲获得百焦耳级准分子激光必须采用快脉冲电子束作泵浦, 同时必须解决大面积均匀电子束的产生、自发辐射放大和寄生振荡的抑制、大口径抗激光破坏紫外光学膜的研制、紫外光学谐振腔的准直等关键技术。

本文研制的百焦耳级准分子激光器由泵浦源、激光气室、谐振腔、真空充气系统、测试准直系统等组成。其装置框图如图 1(a)所示, 图 1(b)为装置结构实物照片。该激光器采用本所研制的“闪光二号”加速器<sup>[14]</sup>作泵浦源, 它是一台低阻抗强流相对论电子束加速器。为了泵浦准分子激光, 在不改变“闪光二号”加速器二极管腔体尺寸且又能满足二极管耐压、磁绝



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Schematic diagram of a 100 J level excimer laser system, (b) Photograph of the experimental setup

1. output line, 2. baffle, 3. diode chamber, 4. diode cathode, 5. hibachi, 6. laser chamber, 7. He-Ne laser, 8. resonator optics, 9. gas filling system, 10. vacuum system, 11~12. photodiode, 13. spectrometer, 14. calorimeter, 15. target chamber,  $S_1 \sim S_4$ . beam splitter,  $F_1 \sim F_2$ . lens, 16. pinhole camera, 17. dynamics measuring system

缘、低电感条件下,设计了泵浦激光用的大面积二极管和栅网系统。二极管阴极长 600 mm,宽 150 mm,两端为 R75 mm 半圆,其结构为黄铜基底上嵌有 766 根石墨针,如图 2 所示,栅网开口面积为  $180 \times 10 \text{ mm}^2$ ,筋宽 2 mm,厚 12 mm,对电子束几何透过率为 88.5%,压力膜为 25  $\mu\text{m}$  钛箔。栅网平面作阳极。

在  $\sim 200 \text{ A/cm}^2$  电流面密度下获得了大面积均匀电子束。图 3 为压力膜后放置的有机玻璃板被电子束轰击的斑痕照片。在 Marx 发生器充电 50~55 kV 条件下二极管工作电压为 780~800 kV,工作电流为 180~210 kA,束能 11~14 kJ,电压半宽  $\sim 80 \text{ ns}$ ,泵浦功率密度为  $1.5 \sim 2.0 \text{ mW/cm}^2$ 。典型的电压、电流波形如图 4(a)、图 4(b)所示。



Fig. 2 The structure of laser diode cathode

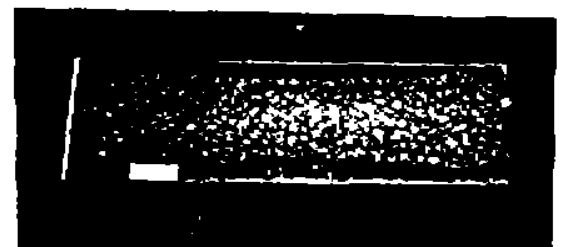
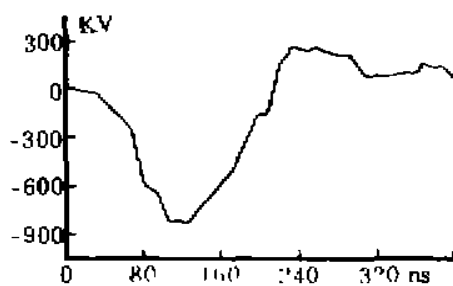
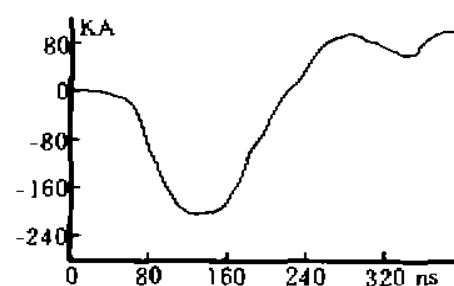


Fig. 3 The pattern on a lucite slab stricken by large area uniform e-beam



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Waveform of diode voltage, (b) Waveform of diode current

激光气室有效激活体积 24 l。镀增透膜的石英玻璃窗口其有效口径为  $200 \times 200 \text{ mm}^2$ ，并且法线与气室中心轴线成  $7^\circ$  夹角，以避免由窗口玻璃之间产生子腔振荡。气室内壁作了喷砂处理以减少寄生振荡。气室外形照片如图 5 所示。

为了获得高能量输出，设计了平行平面腔，为了获得低束散角，同时设计了 3 倍、5 倍等七种虚共焦非稳腔。

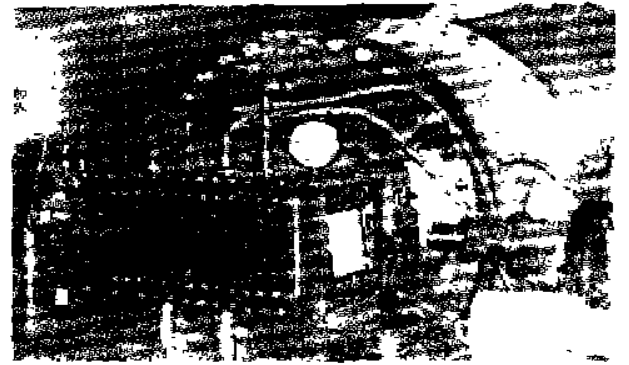


Fig. 5 The general view of a 100 J level excimer laser chamber

### 3 高功率准分子激光实验

#### 3.1 百焦耳级 XeCl 激光实验

在百焦耳级准分子激光试验中，主要采用了如图 1 所示的光路图。激光经  $F_1$  会聚和分束片  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  分束后，分别用大口径 ( $\phi 200 \text{ mm}$ ) 38-8UV5 能量计测激光能量，快速强流光电管 GD-40 (上升时间 0.35 ns) 和 Tek2467B 型示波器 (400 MHz) 测激光波形，E498 型石英光谱仪测激光和荧光光谱；激光束经  $F_1$ 、 $F_2$  会聚后打到靶上产生焦斑，由此计算出激光束发散角，选用 112A21 型压力探头置于激光气室顶部测量电子束在气体中的能量沉积。

工作介质以氖气为缓冲气体时，总气压为 0.3~0.4 MPa；以氙气为缓冲气体时，总气压为 0.15~0.25 MPa，经过对最佳工作条件的摸索，氟化氙激光实验的气分比一般为  $\text{HCl}:\text{Xe}:\text{Ne}=0.3\%:2.7\%:97\%$ 。经过实验的调试和对最佳工作条件的探索，XeCl 激光已稳定运行在 50 J 左右，最大能量为 136 J。激光脉宽 50~100 ns，典型的 XeCl 激光波形如图 6 所示。电子束能量沉积波形如图 7 所示。由测量气室内压力变化可得出电子束在气体中能量沉积为 3.0~3.9 kJ，并据此给出 XeCl 激光器的本征效率为 1.4~3.5%。

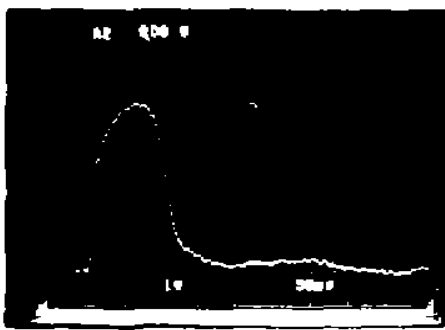


Fig. 6 XeCl laser waveform

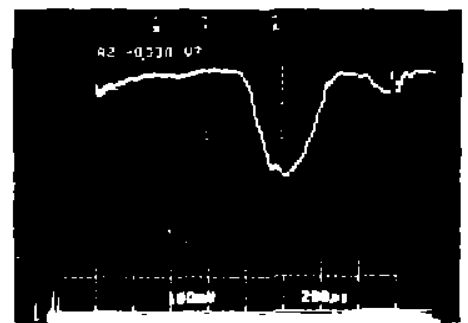


Fig. 7 Waveform of e-beam energy deposition

由于紫外激光器光学元件对可见光反射率很低，传统的准直方法不适合紫外虚共焦非稳腔的准直，本实验采用氦氙激光辅助内调焦望远镜准直的方法，成功地实现了大口径紫外虚共焦非稳腔的准直<sup>[15]</sup>。用 5 倍虚共焦非稳腔使 XeCl 激光的束散角从平行平面腔时的 12.8 mrad 减小到 1.3 mrad。

准分子激光为高增益非存储介质，自发辐射放大 (ASE) 较强，非饱和吸收系数较大，研究这些参数对提高准分子激光器的能量和改善光束品质具有重要意义。但由于它的高增益特性给这些测量工作带来了一定的困难，作者用输出耦合方法和稳态理论得出了 XeCl 激光介质吸收系数。从实测的大多数激光波形来看，激光大约有 50 ns 左右的较平坦的持续时间，如

图 6 所示, 而光子在腔内的往返时间小于 10 ns, 因此可以用稳态理论来计算其输出特性和介质参数。在稳态, XeCl 上能态粒子数  $n^*$  满足微分方程<sup>[16]</sup>:

$$dn^*/dt = R_p - n^*(1/\tau + \sigma I/h\nu) = 0 \quad (1)$$

式中  $R_p$  为泵浦速率,  $\tau$  为上能态寿命,  $\sigma$  为受激发射截面,  $I$  为腔内激光强度,  $h\nu$  为光子能量。在腔内任一位置的激光强度是正反两个方向传播的光强  $I_+$  和  $I_-$  之和, 并满足:

$$\pm dI_{\pm}/dx = I_{\pm}(g - \alpha) \quad (2)$$

$$g = \sigma n^* = g_0/(1 + I/I_s) \quad (3)$$

式中  $g$  为振荡腔内介质增益,  $\alpha$  为非饱和吸收系数,  $g_0$  为小信号增益系数,  $g_0 = \sigma R_p \tau$ ,  $I_s$  为饱和参量,  $I_s = h\nu/\sigma\tau$ 。对(2)式积分并设置一定的边界条件, 用数值计算的方法可以给出输出光强  $I_{out}$  在一定的腔长  $L$  和反射镜透过率  $T$  的条件下与  $\alpha L$ 、 $g_0 L$ 、 $I_s$  的关系。按照 Rice<sup>[16]</sup> 等人的理论计算和实验结果比较,  $\alpha L$  的数值在相当窄的变化范围内, 理论计算曲线可以与实验数据拟合, 因此可以通过测量光强随输出耦合的变化拟合出  $\alpha L$  的数值。图 8 是输出镜透过率  $T = 18 \sim 87\%$  范围内六种不同输出耦合的实测光强和用稳态理论拟合出的输出光强曲线, 由此推算出 XeCl 介质吸收系数为  $0.6\% \text{ cm}^{-1}$ 。

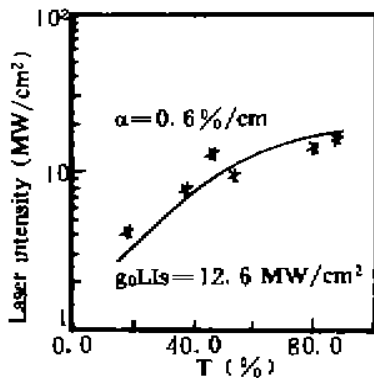


Fig. 8 Laser intensity as a function of output coupling and the fitted plot (\* experimental — fitted plot)

实验还对自发辐射放大的产生及规律进行了初步探索, 在无谐振腔时测量了轴向自发辐射放大总能量约为 1.2 J, 功率 20 MW, 相同泵浦条件下激光能量为 48 J, 功率 1.33 GW, 自发辐射放大出现时间比激光出现时间提前约 30 ns。另外在激光气室后盖板上与中轴线成  $30^\circ$  方向开了一  $\phi 8 \text{ mm}$  孔, 用 GD-40 光电管测量边光信号, 根据标定的探头灵敏度和实测波形算出单位立体角的自发辐射放大能量为 33 mJ/ster。

3.2 百焦耳级 KrF 激光实验

KrF 激光实验以氩气为缓冲气体, 总气压  $0.15 \sim 0.25 \text{ MPa}$ , 气分比一般采用  $F_2:Kr:Ar = 0.4\%:10\%:89.6\%$ 。获得 KrF 激光最大能量达 157 J, 稳定运行在 100 J 左右, 脉冲半高宽为  $80 \sim 100 \text{ ns}$ , 激光功率 2 GW。典型的激光波形如图 9 所示。电子束能量沉积波形如图 10 所示, 同此计算出 KrF 激光本征效率为  $3.0 \sim 4.3\%$ 。用焦斑法测量了平行平面腔条件下激光光束发散角约为  $10 \text{ mrad}$ , 用  $f/5.3$  光学聚焦系统可达功率密度  $2 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 。摸索了不同充气比对 KrF 激光输出能量的影响。图 11(a)和 11(b)为总气压  $0.2 \text{ MPa}$  条件下 KrF 激光输出能量随氟气和氩气气压的变化。

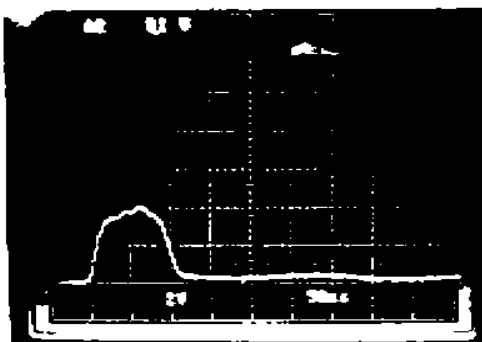


Fig. 9 KrF laser waveform

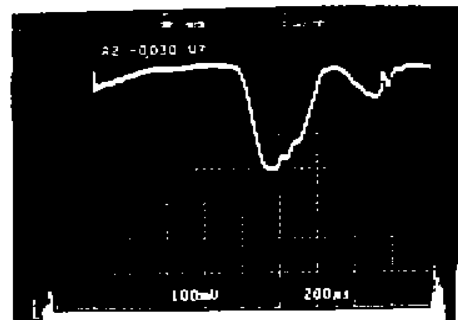


Fig. 10 Waveform of e-beam energy deposition

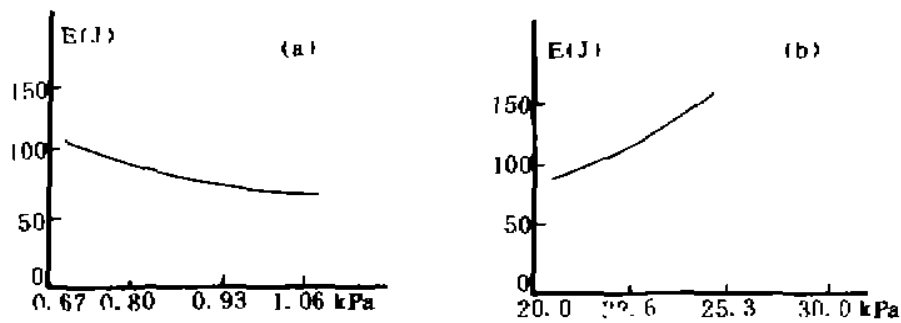


Fig. 11 (a) Output energy as a function of  $F_2$  concentration ( $Kr=20.2$  kPa), (b) Output energy as a function of Kr concentration ( $F_2=0.8$  kPa)

**结 论** 利用“闪光二号”加速器研制成功了百焦耳级氯化氙和氟化氙准分子激光器。在研制过程中，解决了一系列关键技术，系统地测量了准分子激光器参数和部分激光介质参数，并对自发辐射放大(ASE)的产生进行了初步摸索。目前，XeCl 激光稳定运行在 50 J 左右，最大能量 136 J，峰值功率达 1.5 GW；KrF 激光器稳定运行在 100 J 左右，最大能量 157 J，峰值功率达 2 GW。该激光器已在国内首次用于脉冲紫外准分子激光与材料相互作用实验。

Table 1. High power excimer lasers in the world

state	laboratory	laser	energy	time	literature
U. S. A	LANL	KrF(Aurora)	5 kJ	1989	[2]
		KrF(Mercury)	1 kJ	1993	[3]
U. S. A	NRL	KrF(Nike)	3 kJ	1994	[4]
U. S. A	WRC	XeCl	3.5 kJ	1986	[5]
U. K.	RAL	KrF(Sprite)	250 J	1983	[6]
		KrF(Titania)	1.7 kJ	1994	[7]
Japan	ETL	KrF(Ashura)	660 J	1988	[8]
		KrF (Super-Ashura)	8 kJ	1995	
Japan	ILS	KrF	500 J	1988	[9]
China	IAE	KrF	106 J	1991	[10]
China	NINT	XeCl	136 J	1991	[11]
		KrF	157 J	1994	
Russia	HCEP	XeCl	200 J	1992	[12]
Russia	IEA	KrF	100 J	1992	[13]

本课题由吕敏院士提出，并一直得到他的热情关注和支持。参加本工作的还有王丽戈、聂磊、张永民、胡志云、刘建胜、任守强、曾敏、李铁军、黄梅生等同志。作者在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 刘晶儒, 孙瑞蕃, 邱爱慈等, 百焦耳级 XeCl 准分子激光实验研究. *强激光与粒子束*, 1993, 5(1): 23~28
- [2] D. C. Cartwright, J. Figueira, T. E. McDonald *et al.*, Excimer could be laser of choice for next-generation ICF driver. *Laser Focus World*, 1990, 26(3): 103~108
- [3] S. J. Czuchlewski, G. W. York, I. J. Bigio *et al.*, Mercury; The Los Alamos ICF KrF laser system. *Proc. of Laser '92*, Houston, 1992, 139~145
- [4] C. J. Pawley, J. D. Sethian, S. P. Obenschain *et al.*, Large area electron beam generation and propagation for KrF lasers. *Proc. of Beams '92*, Washington D. C., 1992, 1912~1917
- [5] J. R. Oldenettel, K. Y. Tang, Multi-kilojoule narrowband XeCl laser. *Proc. SPIE*, 1986, 710: 117~137
- [6] M. J. Shaw, F. O'Neill, C. B. Edwards *et al.*, Sprite-A 250 J KrF laser. *Appl. Phys. (B)*, 1983, 28(2/3): 127~127
- [7] G. J. Hirst, R. Bailly-Salins, C. J. Hooker *et al.*, The high brightness KrF/Raman facility at RAL; recent results and scheduled developments. *Proc. of Laser '92*, Houston, 1992, 131~138
- [8] Y. Owadano, I. Okuda, E. Yashiro *et al.*, Overview of the super-ashura development, *The 4th International Workshop on KrF Laser Technology*, Annapolis, Maryland, USA, 1994: 1~4
- [9] K. Ueda, Scalability of high power KrF laser for inertial confinement fusion drivers. *Proceedings of the 12th International Conference held by the International Atomic Energy Agency*, Nice, France, 12~19 Oct. 1988, 3: 125~130
- [10] 王乃彦, 单雨生, 曾乃工等, 强流电子束泵浦的百焦耳级氟化氙激光器. *强激光与粒子束*, 1991, 3(4): 411~420
- [11] J. R. Liu, R. F. Sun, A. C. Qiu *et al.*, Development of a 100 J level XeCl laser pumped by intense relativistic electron beam. *Proc. of Beams '92*, Washington D. C., 1992, 1918~1923
- [12] G. A. Mesyats, Y. I. Bychkov, B. M. Kovalchuk, High power XeCl excimer laser. *Proc. SPIE*, 1992, 1628: 70~80
- [13] E. P. Bolshakov, V. A. Burtsev, M. A. Vasilevsky *et al.*, Large-aperture e-beam pumped excimer lasers for ICF. *Proc. of Beams '92*, Washington D. C., 1992: 1930~1934
- [14] 邱爱慈, 李玉虎, 沈志康等, 强流脉冲相对论电子束加速器——闪光二号. *强激光与粒子束*, 1991, 3(3): 340~348
- [15] 甘雨刚, 刘晶儒, 王丽戈, 紫外虚共焦非稳腔光学准直技术. *激光杂志*, 1992, 13(1): 1~3
- [16] J. K. Rice, G. C. Tisone, E. L. Patterson, Oscillator performance and energy extraction from a KrF laser pumped by a high intensity relativistic electron beam. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, QE-16(12): 1315~1326

## Experimental Study on 100 J Level of Excimer Laser Pumped by REB

Liu Jingru    Yuan Xiao    Gan Yugang    Zhao Xueqing    Yi Aiping  
Wang Xiaohong    Wang Longhua    Wei Yanming    Qiu Aici    Sun Ruifan

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)

(Received 25 May 1995; revised 29 July 1995)

**Abstract** A 100 J level of XeCl and KrF excimer lasers pumped by an intense relativistic electron beam (REB) accelerator-Flash I has been developed. The laser cell has an effective excitation volume of 24 liters and a  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  aperture. The pump power density ranges between  $1.5 \sim 2.0 \text{ MW/cm}^3$ . The maximum output energy of 136 J with the pulsewidth of  $50 \sim 100 \text{ ns}$  and peak power of 1.5 GW is obtained for the XeCl (308 nm) laser. The divergence angle is 1.3 mrad by using the positive confocal unstable resonator technique. In KrF (248 nm) laser case, the maximum output energy is 157 J with pulsewidth of  $80 \sim 100 \text{ ns}$  and peak power of 2 GW.

**Key words** relativistic e-beam, high power, XeCl laser, KrF laser.