

文章编号: 0253-2239(2005)07-930-5

## 焦耳量级光抽运 XeF 蓝绿激光器\*

于 力 刘晶儒 马连英 易爱平 黄 超 安晓霞 张永生 苏建仓 曾正中

(西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘要:** 阐述了焦耳量级 XeF(C-A)激光器的总体设计及抽运源辐射能力的测试方法,分析了 XeF(C-A)激光特性参量与 XeF<sub>2</sub> 初始浓度、输出透过率以及气体成分之间的关系。抽运源采用紧凑型结构,有效地减小了放电回路面积,使回路电感降低到 330 nH,从而使放电沉积效率达到 74%,抽运源平均沉积功率密度达到 12 MW/cm。利用分幅相机拍摄了 XeF<sub>2</sub> 光解离波并对抽运源辐射能力进行了诊断,抽运源辐射在 140~170 nm 波段的光子出射通量达到  $5 \times 10^{23} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,辐射亮度温度高于 25 kK。激光器有效激活长度 80 cm,采用平凹谐振腔,激光器获得了稳定的焦耳级能量输出,最大输出能量 2.5 J,总转换效率 0.1%,激光脉宽约为 700 ns。

**关键词:** 激光技术; XeF(C-A)激光; 光抽运; 光解离

中图分类号: TN248.5 文献标识码: A

## Joule Level XeF Laser Operating in the Blue-Green Region

Yu Li Liu Jingru Ma Lianying Yi Aiping Huang Chao An Xiaoxia

Zhang Yongsheng Su Jiancang Zeng Zhengzhong

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

**Abstract:** The design of XeF(C-A) laser and measurement of the pumping source radiation ability are given. The results of experimental study on XeF(C-A) laser properties under different conditions of initial XeF<sub>2</sub> concentration, output transmissivity and gas components are reported and analyzed in detail. The area of discharge circuit is reduced efficiently by using the compact pumping source, and the equivalent inductance of discharge circuit is decreased to about 330 nH, so that the deposited efficiency is up to 74% and the average deposited power density of the pumping source is about 12 MW/cm. Radiative intensity of pumping source is diagnosed by calculating XeF<sub>2</sub> photodissociation wave evolution which is photographed by framing camera. The photon flux in the wavelength of 140~170 nm is about  $5 \times 10^{23} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  of which the radiative brightness temperature is more than 25 kK. The effective gain length of laser is 80 cm and a plane-spherical stable resonator is used. A laser energy output in joule level is stably obtained. The maximum output energy is 2.5 J with the total conversion efficiency of 0.1%, and the laser pulse width is about 700 ns.

**Key words:** laser technique; XeF(C-A) laser; optical pumping; photodissociation

### 1 引 言

自从出现 XeF(C-A)蓝绿激光开始,它的显著特性就备受科学界的关注和青睐。其特性主要表现为:1) 辐射范围 450~520 nm,中心波长 480 nm,属于蓝绿波段,是大气、水下的最佳传输窗口;2) 激光饱和和能量密度高(50 mJ/cm<sup>2</sup>);3) 增益带宽很宽(约 70 nm),允许的超短光脉冲放大可短到 10 fs。上述特性可使该类激光在水下照明、水下探测、超短脉冲

激光放大以及大功率激光器的研制等领域具有广阔的应用前景。

获得 XeF 蓝绿激光的抽运方式有三种:电子束抽运、放电抽运和光抽运。由于电子对激光上能级存在猝灭作用,电子束抽运和放电抽运方式的转换效率都很低,而且电子束抽运的装置庞大,目前广泛用的是光抽运方式。在光抽运方式下,XeF<sub>2</sub> 蒸气作为激光激活介质,氩气和氮气作为缓冲气体。XeF<sub>2</sub>

\* 国家 863 计划项目(AA846050)和国防科技基础研究基金(41302010201)资助课题。

作者简介:于 力(1969~),男,博士研究生,副研究员,主要从事激光技术及脉冲功率技术研究。E-mail: yuli057@sina.com

收稿日期:2004-09-13;收到修改稿日期:2004-12-29

蒸气在 140~170 nm 真空紫外波段存在强烈吸收<sup>[1]</sup>, XeF<sub>2</sub> 主要被光解离为 B 态 XeF\* (B), 该分子与缓冲气体分子碰撞弛豫形成 C 态 XeF\* (C) 分子, C 态向 A 态跃迁形成 XeF(C-A) 辐射, 受激辐射条件下形成 XeF(C-A) 蓝绿激光。

俄、美、法等国先后研制了多种光抽运 XeF 蓝绿激光器<sup>[2~4]</sup>, 其中俄罗斯获得了高能量激光输出 (117 J)<sup>[2]</sup>。我们自 1995 年起开始研究光抽运 XeF 蓝绿激光, 先后获得了毫焦量级和百毫焦量级的激光输出<sup>[5,6]</sup>。需要指出的是, 以前我们研制的激光器的抽运源设计并不十分完善, 抽运源的抽运速率和转换效率都很低。文献[6]中抽运源单位长度的平均沉积功率密度和沉积效率分别仅为 4.5 MW/cm 和 35%。目前已对抽运源结构进行了优化, 很大程度上提高了抽运能力, 用该抽运源光解离 XeF<sub>2</sub> 获得了焦耳级的激光输出。本文将介绍该激光器并给出实验结果。

## 2 激光器总体设计

激光器如图 1 所示, 激光气室为长方体, 主体为铝合金框架结构, 长 116 cm, 容积约 10 升。抽运源安装在气室的侧面, 聚四氟乙烯材料既作为抽运源的放电基板, 又作为气室的侧面板。为了减小腔内损耗, 输出窗采用布儒斯特窗, 口径 4.6 cm×5 cm。抽运源采用单通道分段表面放电抽运源, 有效激活长度 80 cm。谐振腔采用平凹稳定腔, 输出镜采用两种, 对 450~510 nm 波段的透过率分别为 4% 和 8%; 反射凹面镜,  $r=5$  m, 反射率大于 99.5%, 腔长 152 cm。为了抑制 B-X 跃迁, 腔镜对 (351±5) nm 的反射率均小于 10%。机械泵提供激光气室具有 5 Pa 以下的真空度, 激活介质 XeF<sub>2</sub> 的纯度大于 99.5%, 氩气、氮气纯度大于 99.99%。气室内的 XeF<sub>2</sub> 初始浓度由自行研制的浓度测量仪监测<sup>[7]</sup>。

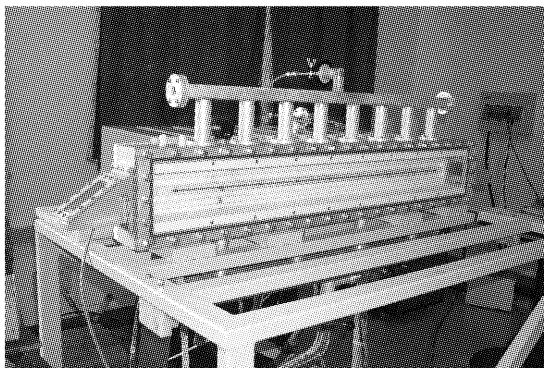


图 1 焦耳量级 XeF 蓝绿激光器

Fig. 1 XeF blue-green laser in joule level

整个抽运源沿光轴方向分为 8 段放电间隙, 每段间隙长 10 cm。每一段由电极和电容器构成独立的放电回路, 电容值为 1 μF 的高压电容器 CTM-40-1 作为储能单元, 能量由高压恒流电源提供, 工作电压 15~35 kV。触发电极位于放电通道下方并埋于放电基板材料中, 触发器提供 25 kV 触发高压, 引起间隙放电。我们对抽运源的研究表明, 减小放电回路面积, 减小回路电感及提高放电通道等效电阻可以有效地提高放电沉积效率和增强抽运源辐射能力<sup>[8]</sup>。该激光器的抽运源在设计上的特点是将抽运源放电基板和激光气室侧面板合二为一, 电极采用“T”型结构, 直接从放电基板内穿出。与文献[6]中的抽运源结构相比, 这种结构使放电回路面积从 500 cm<sup>2</sup> 左右减小为 70 cm<sup>2</sup> 左右, 从而使回路电感从 1.5 μH 降低到 330 nH, 等效电阻从 100 mΩ 提高到 240 mΩ, 因此放电负载与抽运源阻抗更加匹配, 大大增高了放电沉积效率。

## 3 抽运源参量诊断

对于分段表面放电抽运源而言, 重要的是多段间隙放电的一致性。我们用自制的罗可夫斯基线圈监测了多段间隙的放电电流, 电流波形如图 2 所示。多个放电波形的起点、节点或峰值位置的差值定义为时间分散性的测量值, 可以看到各段的放电同步性很好, 多个波形的起点、节点、峰值位置基本重合, 最佳的时间分散性小于 60 ns。经过计算, 25 kV 电压条件下, 电流上升梯度为  $2.9 \times 10^9$  A/s, 最大电流 32 kA, 放电回路的等效电感约 330 nH, 等效电阻约 240 mΩ, 放电沉积效率约 74%, 单位长度平均沉积功率密度 12 MW/cm。

对抽运源辐射能力的诊断是通过四分幅相机拍摄 XeF<sub>2</sub> 光解离波的发展图像加以计算完成的。图 3

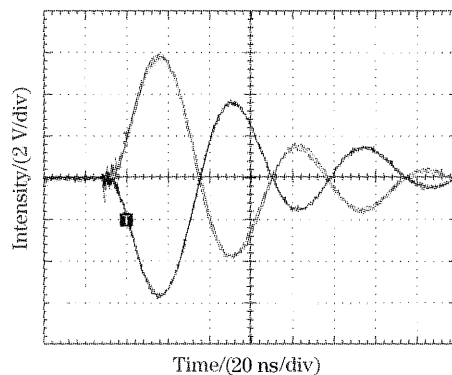
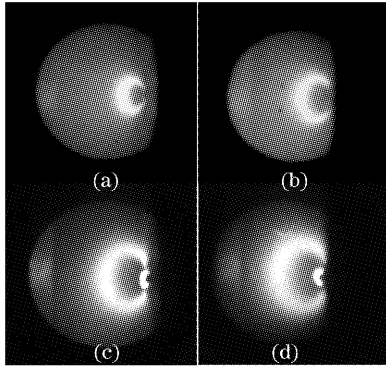


图 2 放电电流波形

Fig. 2 Discharge current waveforms

图 3 XeF<sub>2</sub> 光解离波图像Fig. 3 Photographs of XeF<sub>2</sub> photodissociation wave

是四幅解离波图像,每幅的曝光时间是 5 ns,幅间隔为 160 ns,第一幅与放电电流起点相距 530 ns。图中大半圆是相机的视场,明亮的半圆环是 XeF<sub>2</sub> 光解离波,c、d 中右侧中心的小圆环是放电等离子体。XeF<sub>2</sub> 光解离波其实就是 XeF(C-A) 荧光层在时间、空间上的变化,解离波发展速度、荧光层厚度、寿命等参量均可由此获得。在放电电压 30 kV, XeF<sub>2</sub> 初始浓度为  $1.57 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  条件下,解离波最远能行至距放电基板 3 cm 处,经历时间大约 2.2  $\mu\text{s}$ ,解离层厚度 6~8 mm。在放电的不同时刻,光解离波的发展速度并不相同,初始时刻较大,随后减慢,最大速度超过 25 km/s,平均速度大于 10 km/s。在这么快的运动速度下,以等离子体为轴某一半径处 XeF(C-A) 荧光层的有效存在时间为 700 ns,这与文献 [4,9] 中的 1.2~2  $\mu\text{s}$  有较大差别,主要原因是该激光器抽运源的放电时间远远比上述文献中的小,因此抽运速率较高。XeF<sub>2</sub> 光解离速率  $W$  及辐射源在 140~170 nm 波段内的光子出射通量  $\phi$  可根据下列公式<sup>[4,10]</sup>计算:

$$W = N_0 / \tau_{\text{eff}}, \quad (1)$$

$$\phi = R/r \times V_{\text{pdw}} \times N_0, \quad (2)$$

其中  $R$  是解离波半径, $r$  是放电等离子体半径, $V_{\text{pdw}}$  是解离波发展速率, $N_0$  是 XeF<sub>2</sub> 初始浓度。计算得到光解离速率  $2.2 \times 10^{23} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,光子出射通量为  $5 \times 10^{23} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,由此计算得到辐射亮度温度高于 25 kK。

#### 4 实验结果与激光输出特性分析

激光器以脉冲运行模式进行了激光实验,工作电压 25 kV,总储能电容 8  $\mu\text{F}$ ,气室内总气压 100 kPa,  $x(\text{Ar}):x(\text{N}_2) = 3:2$ , XeF<sub>2</sub> 初始浓度在  $(0.76 \sim 1.4) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  范围内可调。激光脉冲用 GD51Q

光电管测量,输出能量用 Jmax43 能量计探测。在上述浓度范围内均获得了焦耳量级的激光输出,激光器输出耦合率采用两种,在 4% 透过率下,最大输出能量为 1.89 J;在 8% 透过率下,最大输出能量为 2.5 J,激光器总转换效率最高已达 0.1%。激光脉宽约 700 ns,典型的激光波形见图 4。我们用 ULTIMA1024 高速相机拍摄了位于输出镜面上的激光近场光斑,相机速率 2000 帧/s,光斑如图 5 所示,尺寸为 2.7 cm  $\times$  3.6 cm。

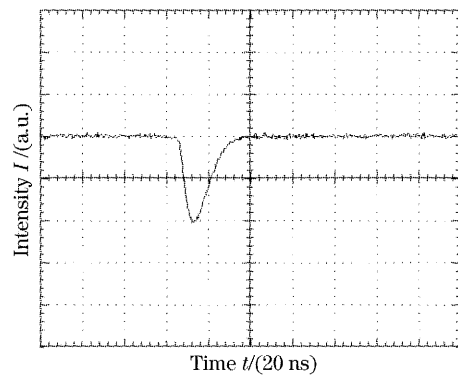


图 4 激光脉冲

Fig. 4 Laser pulse waveform

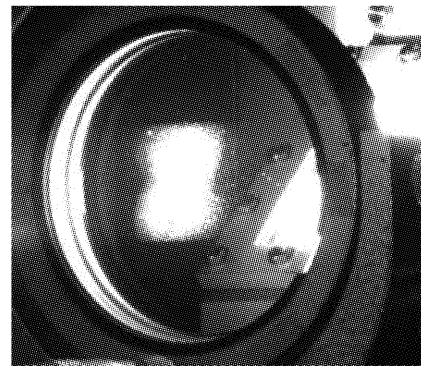


图 5 激光近场光斑

Fig. 5 The near-field laser pattern

下面分别讨论不同 XeF<sub>2</sub> 初始浓度、不同输出耦合系数、不同气体成份对激光特性参量的影响。

##### 4.1 不同 XeF<sub>2</sub> 初始浓度对激光特性参量的影响

XeF<sub>2</sub> 初始浓度与抽运源的辐射能力相互作用共同决定着 XeF<sub>2</sub> 光解离速率,从而影响着 XeF(C-A) 激光的产生和特性。初始浓度低,光解离速率低,上能态粒子少,从而激光输出能量小;初始浓度过高,由于 XeF<sub>2</sub> 对上能态分子的猝灭作用,同样会抑制激光的产生。不同初始浓度对激光输出能量的影响如图 6 所示, $d$  为光轴距抽运源的距离。对于  $d = 13 \text{ mm}$  的情况,随着浓度的增加,输出能量逐渐提高。浓度为  $1.26 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时,出现最大输出能量 1.89 J。之

后,输出能量开始下降,说明 XeF<sub>2</sub> 的猝灭作用逐渐加强。这与上述的理论分析相一致。

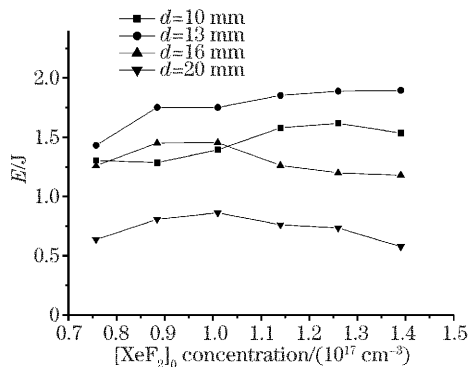


图 6 不同距离时 XeF<sub>2</sub> 激光能量与初始浓度的关系

Fig. 6 Energy versus XeF<sub>2</sub> concentration with different distances

对于不同的光轴位置,最大能量对应不同的初始浓度。从图 6 中可以看到,当光轴距抽运源较近时,最大输出能量出现在高浓度区域;而随着远离光轴位置,最大输出能量出现在低浓度区域。这是因为 XeF<sub>2</sub> 光解离波[XeF(C-A)荧光层]的厚度、发展速度,辐射亮度以及行程与 XeF<sub>2</sub> 初始浓度密切相关<sup>[11]</sup>,初始浓度越低,光解离波发展速度越快,行程越远,荧光层厚度越厚,辐射强度相对较低;随着初始浓度增高,光解离波发展速度变慢,行程变近,荧光层越来越薄,但辐射强度却相对较高。因此,在一定的抽运能力条件下,对于较远的光轴,高浓度时的 XeF(C-A)荧光辐射最强区域已不能到达或只能局部到达光轴位置;相反,对于较近的光轴,低浓度时的荧光最强区域又超越了光轴位置。这两种情况都导致了腔内的荧光不能有效地提取,因而输出能量较低。换句话说,低浓度的荧光辐射最强区域可以与远光轴相吻合,而高浓度的荧光辐射最强区域与近光轴相吻合。

#### 4.2 输出耦合系数对激光能量的影响

光抽运 XeF(C-A)激光增益较低,普遍认为其平均小信号增益系数  $g_0$  一般为  $(1\sim 2)\times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ,同时激光器的腔内损失又较大,因而限制着激光输出。腔内损失主要是由于气体放电导致的气体折射率变化引起的折射损失,腔内折射损失系数可由公式(3)<sup>[2]</sup>计算:

$$\Gamma \approx \sigma_p N_0 \sqrt{2\Delta n L_g / L_c}, \quad (3)$$

$\sigma_p = 3.35 \times 10^{17} \text{ cm}^2$  是 XeF<sub>2</sub> 平均吸收截面,  $N_0$  是 XeF<sub>2</sub> 初始浓度,  $\Delta n$  是介质激活区域折射率变化,  $L_g$  是有效激活长度,  $L_c$  是腔长。对于  $N_0 = 1.14 \times$

$10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\Delta n = 9.8 \times 10^{-8}$ ,  $L_g$  为 0.8 m,  $L_c$  为 1.5 m,由此计算得到  $\Gamma = 1.23 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ,激光往返一次的损耗为 20%。考虑腔内其他损耗,如腔镜的吸收、失调等,总损失约为 23%左右。小信号增益系数  $g_0$  取  $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ ,根据长脉冲激光器最佳透过率公式(4)

$$T_m = \sqrt{2g_0 L_g \alpha} - \alpha, \quad (4)$$

计算,激光器的最佳输出透过率计算值为 4%。

分别用透过率为 4% 和 8% 的输出镜构成的平凹腔进行实验,实验结果如图 7 所示。我们看到 XeF<sub>2</sub> 初始浓度在从  $(0.757 \sim 1.39) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  范围内,8% 透过率获得的激光输出能量均高于透过率 4% 时的输出。在透过率 8%,XeF<sub>2</sub> 初始浓度  $1.26 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  情况下,最大输出能量为 2.5 J。这主要是因为紧凑的激光器结构使抽运源的辐射亮度温度和抽运功率获得了很大的提高,由于抽运速率提高使得激光增益系数随之增大,根据公式(4)计算  $g_0$  为  $3 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 。

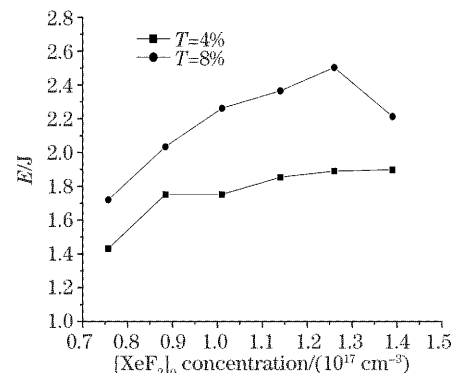


图 7 不同透过率时激光能量与 XeF<sub>2</sub> 初始浓度关系

Fig. 7 Energy versus XeF<sub>2</sub> concentration with different transmissivities

#### 4.3 不同气体成份对激光特性的影响

由 XeF(C-A)激光反应动力学知道,缓冲气体与激活介质 XeF(B)分子的碰撞弛豫过程是形成上能态 XeF(C)分子的必要途径,缓冲气体分子参与激光形成过程<sup>[1]</sup>。因此,缓冲气体的成份、比例将影响激光的特性。

我们在充电电压 25 kV,总电容量为 8  $\mu\text{F}$ ,总气压 100 kPa,透过率 8% 的实验条件下,Ar, N<sub>2</sub> 的粒子数密度比分别为 3:2 和 3:1 时完成了一组对比实验,实验结果如图 8 所示。可以看到,在  $x(\text{Ar}):x(\text{N}_2) = 3:2$  条件下,激光输出能量在各种 XeF<sub>2</sub> 初始浓度的输出能量均比在  $x(\text{Ar}):x(\text{N}_2) = 3:1$  条件下高。由此可见, N<sub>2</sub> 分子浓度对 XeF(C-A)激光的形成有较大贡

献,  $N_2$  气在较高的浓度时, 激光输出能量较大, 这主要是由于  $N_2$  对  $XeF(B)$  分子的碰撞速率大于 Ar 的碰撞速率<sup>[9]</sup>。另外,  $N_2$  对抽运源紫外辐射增强有贡献, 在较高的粒子数密度比下, 紫外辐射加强<sup>[12]</sup>, 有助于提高  $XeF(C-A)$  激光能量。

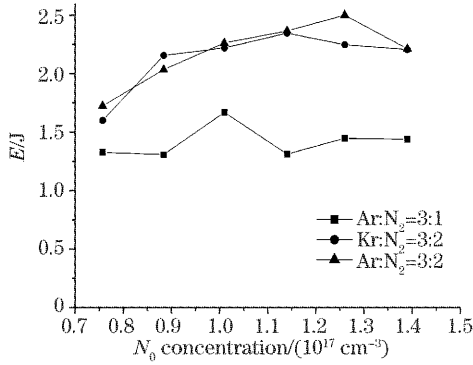


图 8 不同气体成分时激光能量与  $XeF_2$  初始浓度的关系  
Fig. 8 Energy versus  $XeF_2$  concentration with different gas components

文献[13]中指出, 用 Kr 替换 Ar 可使  $XeF(B)$  到  $XeF(C)$  的弛豫速率提高 3~4 倍。我们在粒子数密度比  $x(Kr):x(N_2)=3:2$  条件下进行了实验, 数据见图 8。从结果上看, 激光输出能量没有获得预期的提高, 主要原因是由于  $N_2$  起到了主导作用。

## 5 结 论

成功研制了焦耳级  $XeF(C-A)$  蓝绿激光器, 分段表面放电抽运源可提供 32 kA 放电电流, 沉积功率密度 12 MW/cm, 沉积效率 74%, 140~170 nm 波段光子出射通量大于  $5 \times 10^{23} \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。目前, 激光器处于单次脉冲运行模式, 可以稳定地获得 1 J 以上激光输出, 激光脉宽约 700 ns。不同  $XeF_2$  初始浓度影响激光能量输出, 存在最佳条件。光轴距离抽运源 13 mm,  $XeF_2$  初始浓度为  $1.26 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时, 获得最大 2.5 J 的激光能量, 总转换效率达到 0.1%。输出耦合率为 8% 时, 各初始浓度值相同的条件下激光输出能量均大于输出耦合率为 4% 时的水平, 这显示着该激光器的增益较高, 小信号增益约为  $3 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 。缓冲气体的成份、比例对激光输出特性有明显的影响。

## 参 考 文 献

- 1 N. K. Bivinov, I. P. Vinogradov, L. D. Mikheev *et al.*. Determination of the spectral dependences of absolute quantum yields of  $XeF(B, C, D)$  excimers in photolysis of  $XeF_2$  [J]. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1981, **11**(9): 1178~1181
- 2 V. S. Zuev, G. N. Kashnikov, S. B. Mamaev.  $XeF$  laser with optical pumping by surface discharge [J]. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1992, **22**(11): 973~979
- 3 B. A. Knecht, R. D. Fraser, D. J. Wheeler *et al.*. Compact  $XeF(C-A)$  and iodine laser optically pumped by a surface discharge [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9): 1011~1013
- 4 M. L. Sentis, V. I. Tcheremiskine, Ph. C. Delaporte.  $XeF(C-A)$  laser pumped by formed-ferrite open discharge radiation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(10): 1198~1200
- 5 Hu Zhiyun, Liu Jingru, Yu Li *et al.*.  $XeF(C-A)$  laser pumped by radiation from a segmented surface discharge [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 450~453 (in Chinese)  
胡志云, 刘晶儒, 于力等. 分段表面放电光抽运  $XeF(C-A)$  激光器 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(4): 450~453
- 6 Yu Li, Zhang Yongsheng, Liu Jingru *et al.*. Optically pumped blue-green  $XeF(C-A)$  laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(3): 205~208 (in Chinese)  
于力, 张永生, 刘晶儒等. 光抽运  $XeF(C-A)$  蓝绿激光器 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(3): 205~208
- 7 Zhang Yongsheng, Yu Li, Yi Aiping *et al.*.  $XeF_2$  concentration measurement in the  $XeF$  laser [C]. *6th National Youth Academic Symposium of Laser Science and Technology*, 2001. 485~488 (in Chinese)  
张永生, 于力, 易爱平等.  $XeF$  蓝绿激光器中  $XeF_2$  气体的监测 [C]. *第六届全国激光科学技术青年学术交流会论文集*, 2001. 485~488
- 8 Yu Li, Yi Aiping, Liu Jingru *et al.*. Study on deposition efficiency of sectioned surface discharge [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(3): 209~211 (in Chinese)  
于力, 易爱平, 刘晶儒等. 分段表面放电沉积效率研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(3): 209~211
- 9 L. D. Mikheev, D. B. Stavrovskii, V. S. Zuev. Photodissociation  $XeF$  laser operating in the visible and UV regions [J]. *J. Russian Laser Research*, 1995, **16**(5): 427~475
- 10 V. S. Zuev, L. D. Mikheev. *Photochemical Lasers* [M]. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1984
- 11 Yu Li, Liu Jingru, Ma Lianying *et al.*. Study on temporal and spatial characteristics of  $XeF_2$  photodissociation wave [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(2): 177~180 (in Chinese)  
于力, 刘晶儒, 马连英等.  $XeF_2$  光解离波时空特性研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(2): 177~180
- 12 Yu Li, Liu Jingru, Hu Zhiyun *et al.*. Characteristic study on optical pump source by transverse surface discharge [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(1): 43~46 (in Chinese)  
于力, 刘晶儒, 胡志云等. 横向表面放电光泵浦源特性研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(1): 43~46
- 13 H. C. Brashears, D. W. Setser. Transfer and quenching rate constants for  $XeF(III, 1/2)$  and  $XeF(II, 3/2)$  [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**(9): 821~823