

文章编号: 0253-2239(2001)04-450-04

# 分段表面放电光抽运 XeF(C-A) 激光器

胡志云 刘晶儒 于 力 张永生  
(西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘要:** 阐述了分段表面放电光抽运 XeF(C-A) 激光器的设计和实验技术。分段表面放电辐射源在 140 nm~170 nm 辐射区域亮度温度  $T_b \approx 15 \times 10^3$  K, 用该辐射源作抽运源离解 XeF<sub>2</sub> 获得了 XeF(C-A) 蓝绿(470 nm~495 nm) 激光输出, 激光脉宽为 340 ns, 光谱宽度为 15 nm。

**关键词:** 分段表面放电; 光抽运; XeF(C-A) 激光

中图分类号: TN248.2 文献标识码: A

## 1 引 言

表面放电光抽运 XeF(C-A) 激光具有较高的电-光效率(约为 1%)<sup>[1]</sup> 和较高的输出能量(约为 117J)<sup>[2]</sup>, 能实现波长从 435 nm 到 535 nm 的可调谐输出(线宽约为 0.001 nm)<sup>[3]</sup>, 在对潜通信、海洋探雷、水下摄影等领域有潜在应用前景。XeF(C-A) 增益低, 能量饱和阈值高, 光谱带宽约 70 nm, 在超短脉冲激光(约为 10 fs) 领域有重要价值。

光抽运 XeF(C-A) 激光工作介质是 XeF<sub>2</sub> 蒸气和缓冲气体 N<sub>2</sub>、Ar 或 Kr。XeF<sub>2</sub> 蒸气在 140 nm~170 nm 谱带存在强吸收<sup>[4]</sup>, 最大值在 158 nm 处吸收截面为  $6.7 \times 10^{-17}$  cm<sup>2</sup>。XeF<sub>2</sub> 吸收抽运光离解主要形成 XeF\*(B), XeF\*(B) 经缓冲气体碰撞能快速弛豫到 XeF\*(C)(在 0.1 MPa 缓冲气体 N<sub>2</sub> 作用下其弛豫时间约为 1 ns)<sup>[5]</sup>, XeF\*(C) 受激辐射形成 XeF(C-A) 蓝绿激光。

目前, 我们研制了一种新型结构的抽运光源(分段表面放电辐射源), 该抽运源能产生很强的 140 nm~170 nm 的真空紫外辐射, 用该抽运源离解 XeF<sub>2</sub> 实现了 XeF(C-A) 激光输出。本文介绍激光器的设计技术和实验结果。

## 2 抽运源设计及参数诊断

### 2.1 抽运源设计

自行研制的光抽运源采用了开放式大电流分段表面放电技术, 又称分段表面放电辐射源, 该辐射源是产生紫外、真空紫外辐射最合适的辐射源之一。

分段表面放电辐射源具有操作电压相对低、不需大电流开关、放电等离子体亮度温度高、可重复频率运转、技术简单等优点。

自行研制的分段表面放电辐射源结构示意图如图 1 所示, 辐射源放电通道由 4 个放电间隙沿气室轴排列取向放置, 放电通道总有效长度为 42 cm。每一个放电间隙由一个 CBB30-0.5 高压脉冲电容器提供能量, 电容器直流耐压 30 kV、电容量 0.5 μF。辐射源主电极固定在聚四氟乙烯绝缘基板上, 触发电极紧贴绝缘基板另一表面, 并沿整个放电通道放置, 主电极与触发电极靠绝缘基板绝缘。给触发电极加一快速点火信号, 会在绝缘基板上表面放电通道位置形成滑闪放电, 使所有放电间隙导通, 形成开放式大电流放电, 产生强烈的真空紫外辐射。

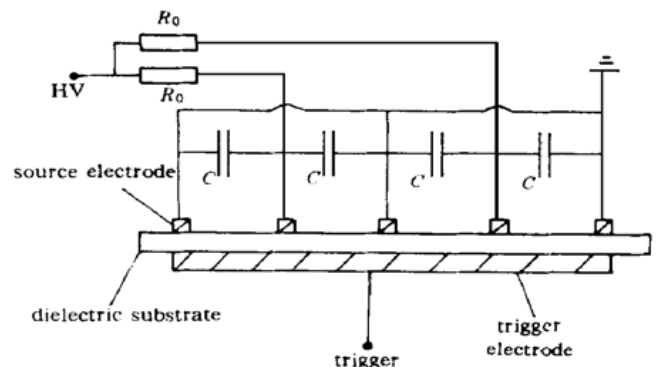


Fig. 1 Segmented surface discharge geometry and equivalent circuit

### 2.2 抽运源参数诊断

XeF\*(C) 辐射寿命约为 100 ns<sup>[1]</sup>, 这决定了分段表面放电辐射源 4 个放电间隙的放电分散时间不能大于 200 ns。我们采用 4 个罗果夫斯基线圈和数字示波器(1 GHz) 同时测量 4 段放电间隙的电流, 所

测 4 段间隙放电电流峰值对应时间的最大差值即为辐射源放电分散时间。典型的电流波形示于图 2, 实验条件为充电电压  $U_0 = 30 \text{ kV}$ , 气压比  $P_{\text{Ar}}: P_{\text{N}_2} = 3: 1$ , 总气压  $P = 0.105 \text{ MPa}$ , 测量的放电电流半周期约为  $1.6 \mu\text{s}$ , 放电分散时间小于  $100 \text{ ns}$ 。经大量实验研究获得了最佳实验条件: 缓冲气体采用 Ar 和  $\text{N}_2$ , 总气压  $P = 0.105 \text{ MPa}$ ,  $\text{N}_2$  气压为  $24 \text{ kPa} \sim 45 \text{ kPa}$ , 储能电容充电电压为  $25 \sim 30 \text{ kV}$ , 触发脉冲峰值大于  $20 \text{ kV}$ 、上升沿时间小于  $100 \text{ ns}$ , 该实验条件下放电半周期约为  $1.6 \mu\text{s}$ , 放电分散时间小于  $100 \text{ ns}$ , 能满足 XeF(C-A) 激光实验条件。

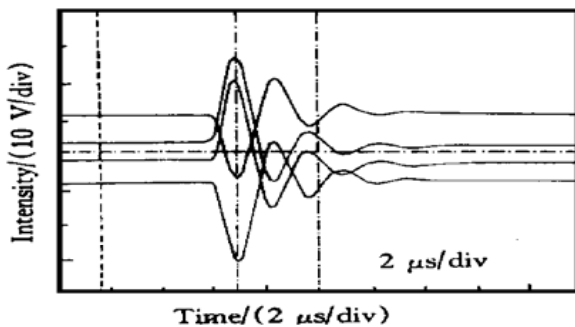


Fig. 2 Representative current waveforms for surface discharge with four sections

分段表面放电辐射源的抽运能力用辐射源表面光强度  $I_\lambda(\Omega, t)$  来描述。开放式大电流放电辐射源属于朗伯辐射源<sup>[6]</sup>, 辐射源表面光强与方向  $\Omega$  无关, 光强度  $I_\lambda(t)$ <sup>[6]</sup> ( $\text{photon}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{s}$ ) 由下式表示:

$$I_\lambda(t) = \frac{1.8836 \times 10^{32}}{\lambda^4 \{ \exp[1.4378 \times 10^7 / \lambda T_b(t)] - 1 \}} \quad (1)$$

$\lambda$  单位是  $\text{nm}$ ,  $T_b$  是辐射源亮度温度, 单位是  $\text{K}$ 。

辐射源在  $140 \text{ nm} \sim 170 \text{ nm}$  辐射区域的光子通量  $\Phi(t)$ <sup>[6]</sup> ( $\text{photons}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ) 由下式表示:

$$\Phi(t) = \int_{140 \text{ nm}}^{170 \text{ nm}} I_\lambda(t) d\lambda \quad (2)$$

抽运光在工作介质中传播,  $\text{XeF}_2$  吸收抽运光产生离解, 因此称为离解波。辐射源在  $140 \text{ nm} \sim 170 \text{ nm}$  辐射区域最大光子通量  $\Phi_e$ <sup>[6]</sup> 可用气室内  $\text{XeF}_2$  初始密度  $N_0$  (单位  $\text{cm}^{-3}$ ) 和  $\text{XeF}_2$  离解波发展速度  $V_{\text{pdw}}$  (单位  $\text{cm}/\text{s}$ ) 表示:

$$\Phi_e = N_0 V_{\text{pdw}} \quad (3)$$

$\text{XeF}_2$  离解形成的产物不能重新合成  $\text{XeF}_2$ , 因此靠近抽运源表面会形成一个  $\text{XeF}_2$  完全离解区域, 在该区域不再形成  $\text{XeF}(C-A)$  辐射。又因  $\text{XeF}_2$  离解产物不吸收抽运光, 所以对于分段表面放电辐射源抽运功率主要沉积在一个不断向外移动的吸收层中, 该

吸收层也称为  $\text{XeF}_2$  离解层, 是工作介质激活区域, 吸收层厚度由气室内  $\text{XeF}_2$  初始浓度决定。离解波速度可由高速条纹相机测量  $\text{XeF}_2$  吸收层  $\text{XeF}(C-A)$  荧光的变化过程获得。高速条纹相机放置于气室窗口前, 条纹相机狭缝与抽运源表面垂直, 且狭缝中心位于气室轴线上, 放电通道位于气室轴正下方约  $1 \text{ cm}$  处, 气室窗口与相机之间放置滤光片 (透过  $460 \text{ nm} \sim 510 \text{ nm}$ ) 和透镜组合。图 3 是采用高速条纹相机在气室窗口拍摄  $\text{XeF}(C-A)$  荧光获得的离解波图像和放电等离子体图像, 图中 1 为离解波图像, 2 为放电等离子体变化图像, 由于主电极的遮挡, 放电等离子体图像迟后于离解波图像。图 3 的实验条件如下:  $U_0 = 25 \text{ kV}$ , 分子数密度  $n_{\text{XeF}_2}: n_{\text{N}_2}: n_{\text{Ar}} = 1.5 \times 10^{16}: 1 \times 10^{19}: 1.5 \times 10^{19} (\text{cm}^{-3})$ , 离解波变化速度  $V_{\text{pdw}} \approx 15 \text{ km}/\text{s}$ 。由 (1) 式 ~ (3) 式计算结果为  $\Phi_e \approx 2.25 \times 10^{22} \text{ photon}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ , 辐射源放电等离子体的最大亮度温度  $T_{\text{b,max}} \approx 15 \times 10^3 \text{ K}$ 。

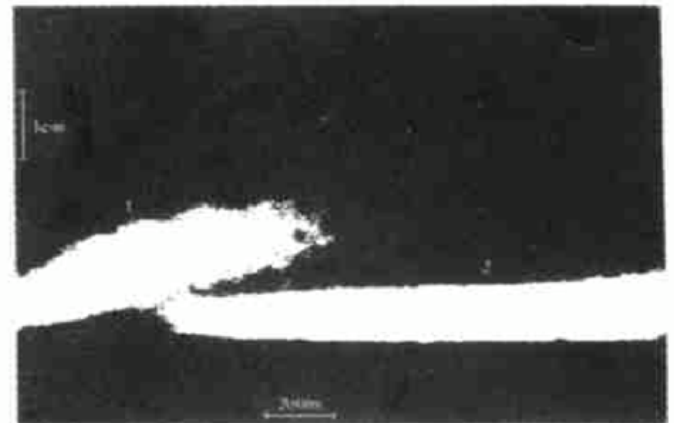


Fig. 3 Streak photographs of the discharge and luminescence wave at  $460 \sim 510 \text{ nm}$ . 1: luminescence, 2: discharge plasma

### 3 XeF(C-A) 激光器总体设计及激光实验结果

#### 3.1 激光器总体设计

图 4 是分段表面放电光抽运  $\text{XeF}(C-A)$  激光器的全貌。分段表面放电辐射源放置于气室内部, 激光器气室长为  $80 \text{ cm}$ , 内径为  $14 \text{ cm}$ , 激光器气室窗口为布儒斯特角窗口。谐振腔采用平凹稳定腔, 全反射镜曲率半径  $r = 5 \text{ m}$ , 在  $450 \text{ nm} \sim 520 \text{ nm}$  波段的反射率  $R = 99.5\%$ ; 输出镜为平面镜,  $460 \text{ nm} \sim 510 \text{ nm}$  波长区域的透过率  $T = 2\%$ 。为避免  $\text{XeF}(B-X)$  激光振荡产生, 谐振腔镜在  $350 \text{ nm} \sim$

353 nm 波长区域的反射率均小于 10%。气室用机械泵抽真空至 5 Pa, 工作气体采用高纯度 XeF<sub>2</sub>、Ar、N<sub>2</sub>。

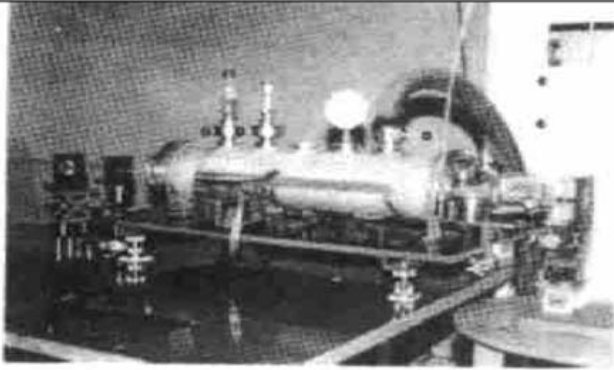


Fig. 4 The general view of XeF(C-A) laser

实验系统布局如图 5 所示, 激光束经滤光片(透过 460~ 510 nm) 滤光 and 全反射镜(反射 450~ 520 nm) 反射, 又经分束片分光, 一束光进入光谱仪测量

激光光谱, 另一束光进入光电管测量激光波形。

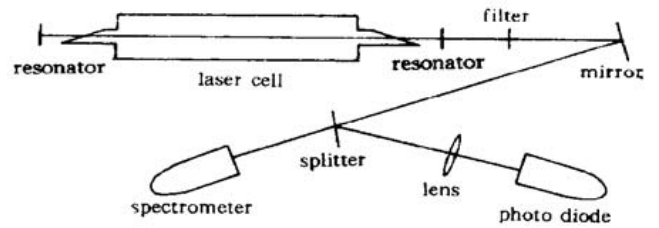


Fig. 5 Schematic diagram of laser experimental system

### 3.2 实验结果及讨论

采用 GD-40 型光电管(上升沿为 0.35 ns) 测量激光波形和荧光波形。图 6(a) 是典型的激光波形。充电电压为  $U_0 = 25$  kV, 分子数密度  $n_{\text{XeF}_2} : n_{\text{N}_2} : n_{\text{Ar}} = 9.2 \times 10^{16} : 1 \times 10^{19} : 1.5 \times 10^{19} (\text{cm}^{-3})$ , 激光脉宽约为 340 ns, 图 6(b) 是在同样实验条件下, 无谐振腔前镜测量的荧光波形, 其半高宽约为 1.4  $\mu\text{s}$ 。

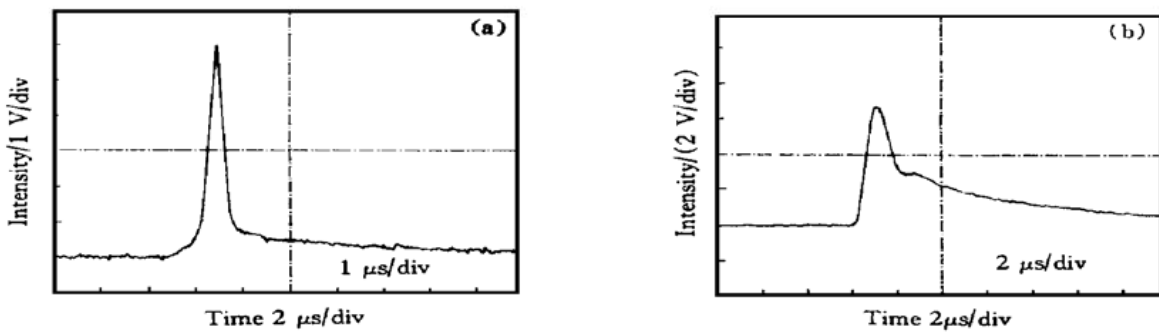


Fig. 6 (a) Laser waveform; (b) Fluorescence waveform

图 7 是采用英国 Hilger Watts 公司生产的 E498 石英光谱仪测量的 XeF(C-A) 激光光谱, 图 8 是图 7 中激光光谱的相对强度曲线。XeF(C-A) 激光辐射光谱区域为 470 nm~ 495 nm, 光谱宽度约为 15 nm, 其中 5 条吸收线由 XeF<sub>2</sub> 离解产生的 Xe 原子吸收造成<sup>[7]</sup> (473.4 nm, 480.7 nm, 483.0 nm, 484.3 nm, 491.6 nm)。

在分段表面放电辐射源放电的整个过程, XeF<sub>2</sub> 的最大离解率  $W_{\text{max}}$  (单位  $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[5]</sup> 为:

$$W_{\text{max}} = \frac{N_0}{\tau_{\text{eff}}} \approx \frac{N_0 \sigma_n \Phi_c}{2.35}, \quad (4)$$

其中  $\tau_{\text{eff}}$  为 XeF<sub>2</sub> 吸收层的有效寿命,  $\sigma_n$  为 XeF<sub>2</sub> 在 140 nm~ 170 nm 区域吸收截面的平均值(约为  $3 \times 10^{-17} \text{cm}^2$ )<sup>[5]</sup>。在  $N_0 = 9.2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  实验条件下,  $W_{\text{max}} \approx 2.7 \times 10^{22} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ , XeF<sub>2</sub> 吸收层的有效寿命约为 3.4  $\mu\text{s}$ 。



Fig. 7 XeF(C-A) laser spectrum

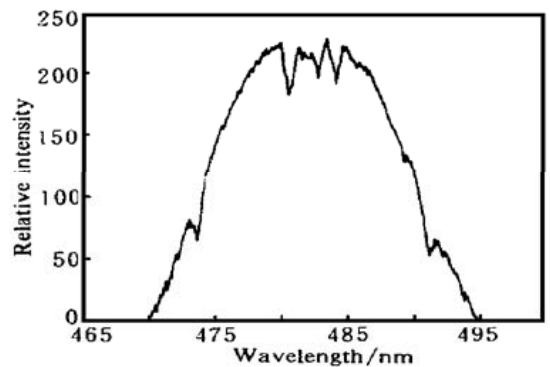


Fig. 8 The curve of laser spectrum

吸收层 XeF(C-A) 小信号增益系数最大值  $g_{0_{\text{max}}}$ <sup>[5]</sup> 为:

$$g_{0_{\max}} = \frac{\gamma_e W_{\max}}{I_{\text{sat}}} = \gamma_e W_{\max} \sigma_{\text{CA}} \tau, \quad (5)$$

这里  $\gamma_e$  是 XeF(B) 的量子效率,  $I_{\text{sat}}$  是 XeF(C-A) 激光饱和参量,  $\sigma_{\text{CA}}$  是 XeF\*(C) 准分子的受激发射截面 ( $9 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ )<sup>[6]</sup>,  $\tau$  是 XeF\*(C) 的寿命。根据文献[1, 5], 在分子数密度  $n_{\text{XeF}_2}: n_{\text{N}_2}: n_{\text{Ar}} = 9.2 \times 10^{16}: 1 \times 10^{19}: 1.5 \times 10^{19} (\text{cm}^{-3})$  实验条件下,  $\tau \approx 4.8 \text{ ns}$ , 由此计算吸收层 XeF(C-A) 小信号增益系数最大值  $g_{0_{\max}} \approx 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ , 平均小信号增益系数  $g_0 = g_{0_{\max}}/2 \approx 5 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ 。谐振腔耦合透过率为 2%, 腔镜膜层吸收为 1%, 激光在腔内往返一次增益长度为 84 cm, 损耗系数约为  $3.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ 。上述分析表明小信号增益系数与损耗系数值接近, 目前实验条件下, 刚能满足激光振荡条件。若要提高激光器效率, 需采取两个措施: 一是加长放电通道长度, 以提高总的增益。二是提高抽运速率, 即提高抽运光强度, 以增大小信号增益系数  $g_0$ 。提高抽运光强度的办法是提高辐射源亮度温度(最佳值  $T_b \approx 3 \times 10^4 \text{ K}$ ), 提高总储能和优化电路结构是提高辐射源亮度温度的重要措施。

**结论** 采用分段表面放电辐射源作抽运源研制 XeF(C-A) 激光器, 分段表面放电辐射源放电分散时间小于 100 ns, 放电等离子体在 140 nm~170 nm 辐射区最大亮度温度约为  $1.5 \times 10^4 \text{ K}$ , XeF(C-A) 激

光脉宽为 340 ns, 激光光谱范围为 470 nm~495 nm, 吸收层 XeF(C-A) 小信号增益系数最大值  $g_{0_{\max}} \approx 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Mikheev L D, Stavrovskii D B, Zuev V S. Photo-dissociation of XeF laser operating in the visible and UV regions. *Journal of Russian Laser Research*, 1995, **16** (5): 427~475
- [2] Zuev V S, Kashnikov G N, Mamaev S B. XeF laser with optical pumping by surface discharges. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1992, **22**(11): 973~979
- [3] Tittel F K, Marowsky G, Nighan W L *et al.*. Injection-controlled tuning of an electron-beam-pumped XeF(C-A) laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**(11): 2168~2173
- [4] Bibinov N K, Vinogradov I P, Mikheev L D *et al.*. Determination of the spectral dependences of the absolute quantum yields of XeF(B, C, D) excimers in photolysis of XeF<sub>2</sub>. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1981, **11**(9): 1178~1181
- [5] Sentis M L, Tcheremiskine V I, Delaporte P C *et al.*. XeF(C-A) laser pumped by formed-ferrite open discharge radiation. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(10): 1198~1200
- [6] Beverly R E III. Kinetic modeling of the photolytic XeF(C-A) laser. *Appl. Phys.*, 1993, **B56**(3): 147~156
- [7] Knecht B A, Fraser R D, Wheeler D J *et al.*. Compact XeF(C-A) and iodine laser optically pumped by a surface discharge. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9): 1011~1013

## XeF(C-A) Laser Pumped Optically by Radiation from a Segmented Surface Discharge

Hu Zhiyun Liu Jingru Yu Li Zhang Yongsheng  
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)  
(Received 1 November 1999; revised 3 January 2000)

**Abstract:** A detailed description of the design and experimental techniques of the XeF(C-A) laser pumped by segmented surface discharge radiation is given. An optical pumping source is developed on the basis of a segmented surface discharge with a brightness temperature  $T_b \approx 1.5 \times 10^4 \text{ K}$  emitting at 140 nm~170 nm. The characteristics of an XeF(C-A) laser pumped by this source are studied. The pulses width (FWHM) of this laser is 340 ns and the width of the emission spectrum (470 nm~495 nm) is about 15 nm.

**Key words:** segmented surface discharge; optically pumped; XeF(C-A) laser