

文章编号 : 0258-7025(2001)07-0629-04

用于抽运 XeF(C-A)激光的分段表面 放电辐射源

胡志云¹ 刘晶儒¹ 于 力¹ 张永生¹ 袁 孝^{1,2}

(¹西北核技术研究所 西安 710024; ²四川大学物理系 成都 610064)

摘要 研制了用于抽运激光的分段表面放电辐射源。辐射源采用分段表面滑闪放电诱导长距离、线性等离子体通道大电流放电,实现了高亮度真空紫外辐射(140~170 nm),且各段总的放电分散时间小于 100 ns。用该辐射源解离 XeF₂ 获得了 XeF(C-A)激光输出。

关键词 分段表面放电 辐射源 激光

中图分类号 TN 248.5 **文献标识码** A

Sectioned Surface Discharge for Pumping XeF(C-A) Lasers

HU Zhi-yun¹ LIU Jing-ru¹ YU Li¹ ZHANG Yong-sheng¹ YUAN Xiao^{1,2}

(¹Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)
(²Physics Department, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract An optical pump source is constructed on the basis of a sectioned low voltage surface discharge in the form of strictly linear plasma channels with a total working length of 42 cm and characterized by a small time scatter of operation (< 100 ns) from the individual sections. The velocity of the dissociation wave and the brightness temperature of 15kK in the spectral range 140~170 nm are calculated in terms of the streak photograph of the XeF(C-A) luminescence. Laser radiation on the C-A transitions from XeF pumped by this source is obtained.

Key words sectioned surface discharge, radiation source, laser

1 引 言

表面放电辐射源属于开放式大电流放电辐射源,能产生强烈的紫外和真空紫外辐射^[1],在激光领域已有诸多应用^[1~3]。分段表面放电辐射源操作电压相对较低、不需要大电流开关,能实现高亮度温度和重复频率运转,且技术上容易实现。本文研究一种新型结构分段表面放电辐射源的电学及辐射特性,并利用该类型辐射源作 XeF(C-A)激光器的光抽运源获得了蓝绿激光输出。

2 辐射源装置

图 1 给出了分段表面放电辐射源的结构示意图。辐射源主体放置于可密封的气室内部,储能系

统和触发系统放置于气室外部。辐射源放电通道由四个放电间隙沿气室轴排列取向放置,每个放电间隙由一个耐压 30 kV,容量 0.5 μF 低电感脉冲电容器提供能量。辐射源主电极固定在绝缘基板上,触发电极紧贴绝缘基板另一表面,并沿整个放电通道放置。高压源是最大量程 60 kV 的高压直流电

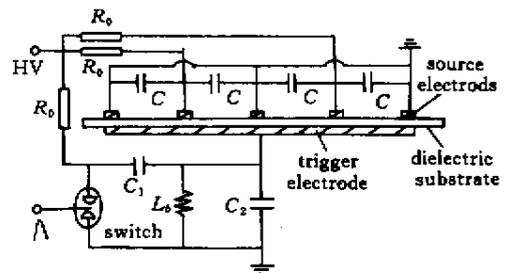


图 1 分段表面放电辐射源结构示意图

Fig. 1 Geometry of the sectioned surface-discharge radiation source

源, R_0 是自制的限电流电阻 ($> 1 \text{ M}\Omega$)。触发系统由电容 C_1 、峰化电容 C_2 、三电极火花隙开关、直流高压电源、限流电阻 R_0 、接地电感 L_b 构成。

3 辐射源的电学特性

3.1 击穿特性

分段表面放电辐射源采用电场极不均匀的具有强垂直分量的绝缘结构, 触发信号到来前, 在直流电压作用下的放电间隙击穿电压比同样条件自由火花隙的击穿电压略低, 击穿电压 U_{br} 与气压 p 和间隙 d 服从 Paschen 定律 ($U_{br} \propto pd$)。若实验条件为 $d \approx 10.5 \text{ cm}$, $p \approx 0.1 \text{ MPa}$ ($[\text{Ar}]:[\text{N}_2] \approx 3:1$), 击穿电压比所加电压 ($\leq 30 \text{ kV}$) 高得多, 放电间隙不会击穿。快速点火触发信号到达, 由于极不均匀电场具有强垂直分量绝缘结构, 辐射源在快速上升沿触发脉冲作用下, 会造成绝缘基板上表面放电通道位置产生强电场畸变, 形成滑闪放电, 产生大量的带电质点, 使放电间隙击穿电压远远低于同样条件下自由火花隙的击穿电压, 若滑闪放电足够强, 放电间隙击穿电压会低于主电极所加电压, 从而导致放电间隙击穿, 形成大电流放电。上述分析表明, 由于长距离沿面放电间隙的击穿电压主要由滑闪放电的强弱来决定, 滑闪放电越强, 放电间隙击穿电压越低。减小滑闪放电起始电压 U_0 可增强滑闪放电的强度, 对于极不均匀电场具有强垂直分量绝缘结构, 滑闪放电起始电压 U_0 主要与气体成分、气体压强、触发脉冲以及装置结构有关^[4]

$$U_0 = \frac{AE_0}{\sqrt{\omega C_0 R_s}} \quad (1)$$

$$C_0 (\text{pF/cm}^2) = 0.88\epsilon/\Delta \quad (2)$$

A 为常数, E_0 为击穿场强, 由气体成分和压强决定, ω 为触发信号角频率; C_0 为比表面电容^[1], 即绝缘层单位面积上表面与触发电极之间的电容; R_s 为绝缘基板表面电阻率, ϵ 为其介电常数, Δ 为其厚度, 单位 mm。

3.2 放电分散性

分段表面放电辐射源的放电通道由多个放电间隙构成, 因各种因素的影响, 所有放电间隙的击穿存在分散性, 若分散时间超过一定的范围, 激光抽运区域沿光轴方向的均匀性变差, 这将严重影响激光输出。减小放电分散时间措施主要有提高充电电压、触发脉冲电压和减小滑闪放电起始电压, 由公式 (1) 知增大比表面电容和触发脉冲角频率可

有效减小滑闪放电起始电压。另外气体成分对放电分散时间也有很大影响, XeF(C-A) 激光实验采用氩气和氮气作缓冲气体, 氮气含量过高或过低都会增大放电分散时间, 氮气含量存在最佳值。采用四个罗柯夫斯基线圈和四通道示波器同时测量四段放电间隙的电流波形研究了放电分散性, 获得了最佳实验条件: 比表面电容 $C_0 = 1 \text{ pF/cm}^2$, 气室内充 Ar 和 N_2 , 总气压 $p = 0.105 \text{ MPa}$, N_2 气压 $24 \sim 45 \text{ kPa}$, 充电电压 $20 \sim 30 \text{ kV}$, 触发脉冲峰值 $> 30 \text{ kV}$, 上升沿时间 $< 60 \text{ ns}$ 。在上述实验条件下, 测量的四段放电间隙典型电流波形如图 2, 其放电分散时间小于 100 ns , 能满足 XeF(C-A) 激光实验要求。

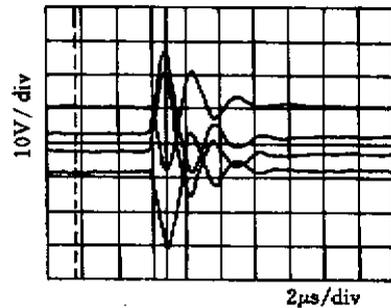


图 2 四段放电间隙电流波形

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

3.3 电路参数

放电通道从击穿到熄灭, 其带电质点以及体积不断变化, 这决定了放电通道的电感和电阻也是不断变化的。测量任意时刻放电回路的电感和电阻尚没有有效的测试方法, 但每一个放电间隙构成回路可看作 RLC 回路, R 为等效电阻, L 为等效电感, C 为储能电容, 依据测量的电流波形可以估算放电回路的等效电感和等效电阻。如果 $R^2/4L^2 \ll 1/LC$, 求解 RLC 回路得到 L 和 R 的计算公式

$$L \approx \frac{T^2}{4\pi^2 C} \quad (3)$$

$$R \approx \frac{2L}{t_2 - t_1} \ln \left| \frac{i_1}{i_2} \right| \quad (4)$$

T 为放电电流周期 (i_1, t_1) 和 (i_2, t_2) 为电流波形第一个周期中两极值点对应的电流和时间。图 2 中通道 4 电流波形的放电周期 $T \approx 3.2 \mu\text{s}$, $t_2 - t_1 \approx 1.5 \mu\text{s}$, $i_1/i_2 \approx -1.7$, 由公式 (3) (4) 得出 $L \approx 480 \text{ nH}$, $R \approx 370 \text{ m}\Omega$ 。

4 辐射特性

4.1 辐射光谱

采用 E498 型石英摄谱仪和紫外 I 型干板记录放电等离子体辐射,紫外 I 型干板的感光范围为 230~500 nm。图 3 是在 [Ar]:[N₂]=3:1,总气压 0.105 MPa,充电电压 30 kV 条件下,且石英摄谱仪的狭缝垂直于抽运源表面所拍摄的放电辐射的积分光谱,从图 3 可看出放电辐射光谱的主要特征是连续谱带上叠加了线谱,连续谱带的范围很宽,从可见光一直延伸到远紫外,线谱主要由热气体的辐射线谱以及电极和绝缘基板受热蒸发到放电通道

中的原子或分子的辐射线谱组成。大电流放电辐射谱可看作准黑体辐射^[5],特别是连续谱可由黑体辐射温度描述。由于放电等离子体在不同辐射波段存在不同的光学厚度,因此在不同辐射波段对应的黑体辐射温度会有所不同,常用亮度温度 $T_b(\lambda)$ 表示,它对应在波长 λ 与辐射源具有同样辐射强度的绝对黑体温度。在可见光波段,光学厚度远大于 1,辐射主要来自放电通道的外部区域;在紫外波段随波长减小,放电等离子体逐渐变得透明,特别是远紫外波段,辐射主要来自温度较高的放电等离子体中心区域,这也是图 3 中放电等离子体尺寸随波长减小而减小的原因。



图 3 放电辐射积分谱

Fig.3 Integrated photographs of a surface discharge

4.2 亮度温度

分段表面放电辐射源属于朗伯辐射源,辐射源表面光谱强度 I_λ (photons/cm²·nm·s)与方向 Ω 无关,并由辐射源亮度温度 $T_b(\lambda, t)$ 描述^[6]

$$I_\lambda(t) = \frac{1.8836 \times 10^{32}}{\lambda^4 \left[\exp\left(\frac{1.4378 \times 10^7}{\lambda T_b(\lambda, t)}\right) - 1 \right]} \quad (5)$$

λ 单位为 nm, $T_b(\lambda, t)$ 单位为 K。光抽运 XeF(C-A)激光介质采用 XeF₂ 蒸气, XeF₂ 蒸气吸收谱带位于 140~170 nm^[7],辐射源在 140~170 nm 波段亮度温度可由高速条纹相机测量 XeF₂ 解离波速度计算^[6]

$$\int_{140}^{170} I_{\lambda, \max} d\lambda = N_0 * V_{pdw} \quad (6)$$

$I_{\lambda, \max}$ 为辐射源表面最大光谱强度, N_0 为 XeF₂ 初始密度(单位 cm⁻³), V_{pdw} 为 XeF₂ 解离波发展速度(单位 cm/s), XeF₂ 解离波速度可由高速条纹相机测量 XeF₂ 吸收层 XeF(C-A) 荧光的发展过程获得。高速条纹相机置于气室窗口前,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 cm 处,气室窗口与相机之间放置滤光片(透 460~510 nm)和透镜组合。图 4 是采用高速条纹相机在气室窗口拍摄 XeF(C-A) 荧光获得的解离波和放电等离子体图像, 1 为解离波图像, 2 为放电等离子体发展图像, 由于主电极的遮挡,放电等离子体图像滞后解离波

图像。图 4 实验条件为 $V_0 = 30$ kV [XeF₂]:[N₂]:[Ar]= 1.5×10^{16} : 1×10^{19} : 1.5×10^{19} ,解离波发展速度 $V_{pdw} \approx 15$ km/s,辐射源在 140~170 nm 波段的最大亮度温度 $T_{b, \max} \approx 15$ kK。

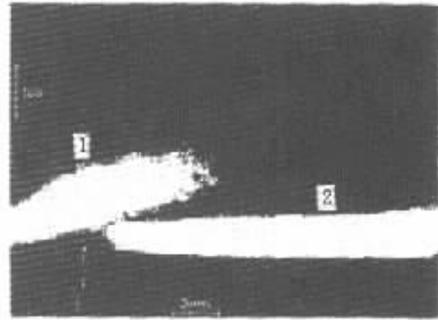


图 4 解离波(1)和放电等离子体(2)条纹照像

Fig.4 Streak photographs of the luminescence wave(1) and discharge(2) at 460~510 nm

4.3 输出抽运光光谱强度及效率

由于放电等离子体是一个从发展到熄灭的过程,整个过程亮度温度不断变化,因此辐射源表面光谱强度也是随放电发展变化的,依据文献[6]的亮度温度曲线可近似计算放电发展整个过程的亮度温度,再结合公式(5)可计算辐射源在 XeF₂ 蒸气吸收谱带及其附近的第一个放电半周期平均表面光谱强度 $I_{\lambda e}$,计算结果如图 5。图 5 表明在辐射源亮度温度 $T_{b, \max} \approx 15$ kK 时, $I_{\lambda e}$ 最大值对应的波长

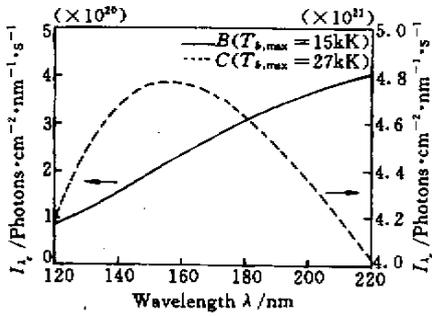


图5 计算的放电半周期平均光谱强度

Fig.5 Average spectral intensity during the first discharge half-period

大于 220 nm,若将 $T_{b,max}$ 提高到 27kK, $I_{\lambda e}$ 最大值对应波长是 XeF_2 吸收带的中心波长 156 nm。辐射源输出抽运光效率 η 定义为辐射源产生的 140 ~ 170 nm 真空紫外辐射能量 E_f 与总储能 E_0 的比值,即

$$\eta = \frac{E_f}{E_0} = \frac{\int_{0}^{\tau/2} \int_{140}^{170} [2\pi r(t) M_\lambda(t) hc/\lambda] d\lambda dt}{0.5 CV_0^2} \quad (7)$$

其中放电等离子体半径 $r(t) \approx 0.3$ cm, 单个放电间隙有效长度 $l \approx 10.5$ cm, c 为光速, h 为普朗克常数, 单个电容器容量 C 约 0.5 μF , 充电电压 30 kV, 计算的辐射源输出抽运光效率约 0.2%。要提高辐射源在 140 ~ 170 nm 波段辐射效率, 由图 5 知需将辐射源最大亮度温度提高到约 27kK, 这需将辐射源单位长度沉积功率密度由目前的 10 MW/cm 提高到约 41.6 MW/cm^[6], 采取措施有两个: 一是增大电容储能; 二是优化电路结构, 减小电路电感。

4.4 XeF(C-A) 激光实验

用研制的分段表面放电辐射源作 XeF(C-A) 激光器的光抽运源, 开展了 XeF(C-A) 激光实验研究, 为减小腔内损耗, 气室窗口设计为布儒斯特角窗口, 谐振腔采用平凹稳定腔, 腔镜在 460 ~ 510 nm

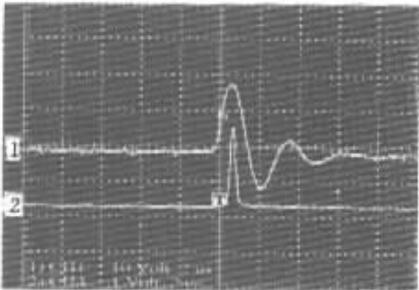


图6 电流波形(1)和激光波形(2)

Fig.6 Current waveform(1) and laser waveform(2)

区域耦合透过率约 2%。用 GD40 光电管测量的 XeF(C-A) 激光波形如图 6, 激光在电流峰值附近产生, 激光脉宽约 300 ns, 这也说明辐射源亮度温度需要提高。图 7 是激光光谱的相对强度曲线, XeF(C-A) 激光辐射光谱区域为 470 ~ 495 nm, 光谱宽度约 15 nm, 其中 5 条吸收线由 XeF_2 解离产生的 Xe 原子吸收造成。

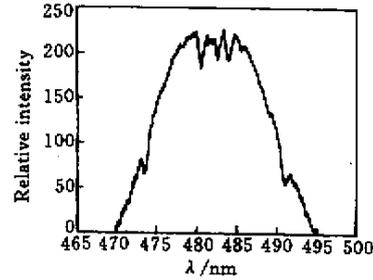


图7 激光光谱相对强度曲线

Fig.7 Curve of laser spectrum

5 结 论

研制的用于抽运激光的真空紫外辐射源采用分段表面滑闪放电诱导长距离、线性等离子体通道大电流放电技术, 实现了高亮度真空紫外辐射(140 ~ 170 nm) 辐射源放电回路等效电感约 470 nH, 等效电阻约 370 mΩ, 放电分散时间小于 100 ns, 辐射源输出抽运光效率约 0.2%。用该辐射源解离 XeF_2 获得了 XeF(C-A) 激光输出, 激光脉宽约 300 ns, 激光光谱 470 ~ 495 nm。

参 考 文 献

- 1 R. E. Beverly III. Electrical, gasdynamic, and radiative properties of planar surface discharges. *J. Appl. Phys.*, 1986, **60**(1):104 ~ 124
- 2 B. A. Knecht, R. D. Fraser, D. J. Wheeler *et al.*. Compact XeF(C-A) and iodine laser optically pumped by a surface discharge. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9):1011 ~ 1013
- 3 V. S. Zuev, G. N. Kashnikov, S. B. Mamaev. XeF laser with optical pumping by surface discharges. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1992, **22**(11):973 ~ 979
- 4 Zhu Deheng, Yan Zhang. High Voltage Insulation. Beijing: Tsinghua University Press, 1992 (in Chinese)
- 5 S. N. Bugrimov, A. S. Kamrukov, G. N. Kashnikov *et al.*. High-brightness pulse-periodic ultraviolet radiation source utilizing a linearly stabilized surface discharge. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1986, **16**(1):44 ~ 50
- 6 R. E. Beverly III. Kinetic modeling of the photolytic XeF(C-A) laser. *Appl. Phys. B*, 1993, **56**(3):147 ~ 156
- 7 L. D. Mikheev, D. B. Stavrovskii, V. S. Zuev. Photodissociation XeF laser operating in the visible and UV regions. *J. Russian Laser Research*, 1995, **16**:427 ~ 475