

文章编号 1004-924X(2011)02-0374-06

# 光泵浦源重频运行稳定性

黄超,刘晶儒,于力,马连英,安晓霞,朱峰

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,陕西 西安 710024)

**摘要:**为了研究表面放电光泵浦源的重频运行稳定性,以高纯度  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷作为放电基底,研制了重频分段线性表面放电光泵浦源模块,研究了不同条件下泵浦源模块的放电抖动和辐射强度波动。研究发现,当重复频率在 1~10 Hz 时,泵浦源的放电抖动主要受充电电压、触发脉冲电压和放电间隙长度的影响,随运行频率的变化较小;辐射强度波动主要与充电电压相关,基本不受混合气体气压和重复频率变化的影响。在合适的条件下,泵浦源的放电抖动  $< 30$  ns,辐射强度波动优于 2%。研究结果表明,该光泵浦源模块的重频运行稳定性良好。

**关键词:**光泵浦源;重复频率;稳定性;表面放电

中图分类号:TN245 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111902.0374

## Operation stability of repetitively pulsed optical pumping sources

HUANG Chao, LIU Jing-ru, YU Li, MA Lian-ying, AN Xiao-xia, ZHU Feng

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest  
Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** An optical pumping source by segmented surface discharge on a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic substrate was developed to realize the pulse repetitive stability of surface discharge. The discharge jitter and the deviation of radiation intensity were investigated in detail under different conditions. The experimental results show that the discharge jitter mainly depends on the charging voltage, trigger pulse voltage and the distance of discharge gap, and the pulse repetition rate has a little influence on the discharge jitter in the range of 1 to 10 Hz. Furthermore, the deviation of radiation intensity mainly depends on charging voltage, and does not be affected by the pulse repetition rate and gas pressure. Normally, the discharge jitter can be less than 30 ns, and the deviation of radiation intensity is below 2%. Research results indicate that the optical pumping source has good discharge stability.

**Key words:** optical pumping source; repetition rate; stability; surface discharge

## 1 引言

XeF(C-A)蓝绿激光的辐射波长和单脉冲能量较为符合激光水下应用对激光源的要求,因而高重频稳定运行的XeF(C-A)蓝绿激光源在激光水下应用方面具有很好的应用前景。目前,单脉冲能量达到焦耳级的重频XeF(C-A)蓝绿激光器的运行频率仅为1 Hz,并且运行稳定性较差。研制高功率高重频稳定的XeF(C-A)蓝绿激光器的关键在于相应的光泵浦源的研制。

表面放电辐射源具有辐射带宽宽、紫外辐射强、电光转换效率较高和能获得大面积稳定均匀辐射等优点,在材料处理、表面清洁、食物杀菌、紫外预电离和紫外光泵浦激光等方面有着很大的应用潜力。尤其在紫外光泵浦激光领域,随着激光技术的发展,具有强紫外辐射的表面放电辐射源已成功作为XeF(C-A)<sup>[1-4]</sup>和Iodine<sup>[5]</sup>激光器的光解离源;HF等化学激光器的光引燃源<sup>[6]</sup>和染料激光器的光泵浦源<sup>[7]</sup>。

在国外,对表面放电光泵浦源已开展了大量研究。1986年,R. E. Beverly III等人以不同的陶瓷和聚四氟乙烯作为放电基底,研究了平板表面放电的电学特性、气体动力学特性和辐射特性<sup>[8]</sup>。2000年,F. A. Tuema等人测量了不同混合气体成份及气压条件下BaTiO<sub>3</sub>陶瓷表面放电的辐射光谱<sup>[9]</sup>。2001年,R. A. Fouracre等人测量了蓝宝石表面放电在6个谱段(200~300 nm, 300~400 nm, 400~500 nm, 500~600 nm, 600~700 nm, 大于700 nm)上辐射光谱的能量分布,分析了放电电流和输入电压脉冲宽度等因素对辐射光谱的能量分布影响<sup>[10]</sup>。2002年,D. J. Fulker等人研究了在氙气中平板表面放电等离子体阻抗的时间特性<sup>[11]</sup>。在国内,于力等人从20世纪90年代开始研究表面放电,2003年他们报道了在聚四氟乙烯介质上分段表面放电的电沉积效率,这种表面放电光泵浦源的放电沉积效率达到了80%<sup>[12]</sup>。2007年,于力等人介绍了聚四氟乙烯分段表面放电光泵浦源的重频运行特性<sup>[13]</sup>。在以

上报道中,对表面放电光泵浦源的研究主要关注于提高放电功率、沉积效率以及紫外辐射强度,对重频运行稳定性尚缺乏深入细致的研究。

本文以Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷作为放电基底,研制了重频表面放电光泵浦源模块,详细地讨论了不同条件下泵浦源模块的重频运行稳定性(时间稳定性和辐射强度稳定性)。

## 2 实验装置与参数测量

光泵浦源模块的外形结构如图1所示,该装置包括3个部分:放电室、进气管道和排气管道。表面放电光泵浦源安装在放电室的侧面,它以99% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷作为放电基板,陶瓷基板粘贴在聚四氟乙烯板上,采用带垂直分量极不均匀场的分段表面放电形式,每段放电间隙长度为8~10 cm。实验中采用美国NorthStar公司生产的PVM-5分压器测量泵浦源的放电电压,该分压器的带宽为80 MHz,测量脉冲电压为0~100 kV,分压比为1 000:1。利用罗可夫斯基线圈测量泵浦源的放电电流,GD51光电管探测泵浦源放电辐射光。图2为表面放电泵浦源重频运行的典型实验波形,由上至下分别为放电电压 $U_d$ 、放电电流 $i$ 、触发电压 $U_t$ 和放电辐射荧光 $I$ ,每个图形包含30个脉冲。

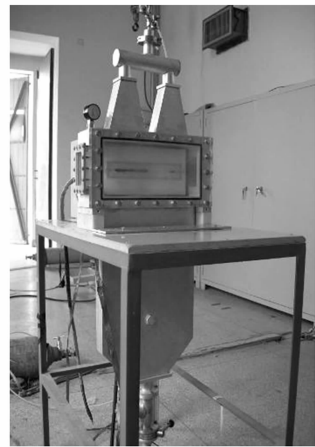


图1 光泵浦模块的照片

Fig. 1 Photograph of pumping source setup

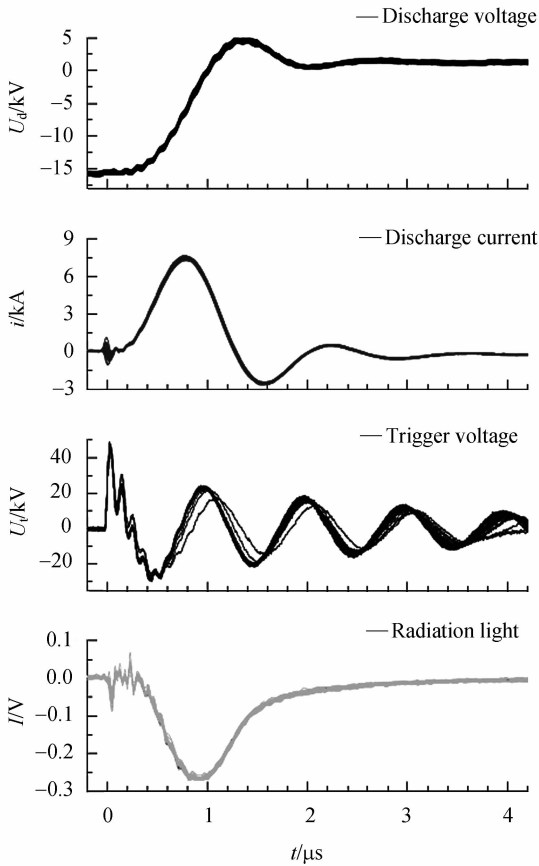


图 2 光泵浦源的典型放电波形

Fig. 2 Typical discharge waveforms of optical pumping source

### 3 时间稳定性

表面放电光泵浦源的时间稳定性是指泵浦源模块在重频运行过程中多次放电的抖动  $\tau_j$ , 定义为泵浦源多次放电的电流上升沿 10% 时刻与相应的触发脉冲上升沿 10% 时刻之差  $t_d$  (表面放电延时) 的极差, 如下式:

$$\tau_j = \max |t_{d,m} - t_{d,n}| \quad (1)$$

式中  $t_{d,m}, t_{d,n}$  为第  $m$  次和第  $n$  次的放电延时。

在充电电压  $U_c$  分别为 13.5, 17.8, 22.4 和 26.8 kV, 混合气体气压  $p$  为 100 kPa, Ar : N<sub>2</sub> = 3 : 2, 放电间隙长  $L$  为 8 cm, 触发电压为 55 kV, 重复频率  $f$  为 2 Hz, 放电基板厚度  $d$  分别为 2 mm 和 3 mm 的实验条件下, 泵浦源重频运行 30 个脉冲的放电抖动变化规律如图 3 所示。图中可见放电抖动随充电电压的升高而下降; 电压越高,  $\tau_j - U_c$  曲线的斜率越小, 表明抖动的变化随电压升

高呈现变缓的趋势。放电基板的绝缘厚度越大, 抖动越大, 抖动随电压升高下降得越快。这主要是因为电压越高、绝缘厚度越小, 外加触发脉冲时主电极表面附近的场畸变越大, 场致发射越强、电子密度越大、单个电子能量越大, 撞击绝缘介质表面或气体介质分子形成的二次电子崩越容易, 表面放电发展越快, 放电抖动越小。当电压为 17.8 kV 时, 基板厚度为 2 mm 和 3 mm 的泵浦源放电抖动分别为 50.9 ns 和 70.3 ns; 电压升高至 26.8 kV 时, 抖动分别降至 26.6 ns 和 29.9 ns。

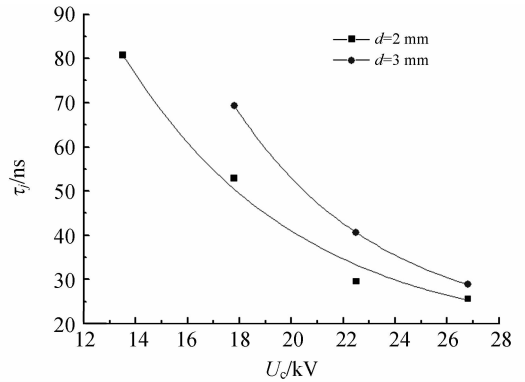


图 3 放电抖动随电压的变化

Fig. 3 Discharge jitter as a function of charging voltage

图 4 是充电电压为 26.8 kV, 混合气体气压为 100 kPa, Ar : N<sub>2</sub> = 3 : 2, 触发电压为 55 kV, 重复频率为 2 Hz 条件下, 放电抖动随放电间隙长度变化的曲线。图中可见放电间隙增长, 放电抖动呈上升趋势。当间隙长度由 8 cm 增加至 10 cm, 放电抖动从 26.6 ns 增大到 62.3 ns。增大放电间隙长度, 通道的静态自击穿电压增大, 在充电电压相同的情况下, 降低了放电通道的欠压比, 这将导致模块的放电抖动变大; 另外由于间隙长度增加, 电极间的电场将被减弱, 必将降低触发预电离产生的电子能量, 这也将增大放电抖动。

图 5 为不同触发电压下泵浦源放电 30 个脉冲的抖动。实验条件: 充电电压分别为 17.8, 22.5 和 26.8 kV, 混合气体气压为 100 kPa, 放电间隙长 8 cm, 重复频率为 2 Hz。图中可见, 泵浦源重频运行时, 放电抖动随触发电压的升高而下降, 触发电压越大, 抖动随触发电压增大而下降的速率变慢。在高充电电压条件下, 抖动随触发电压上升而减小的趋势较缓慢, 当充电电压为 26.8

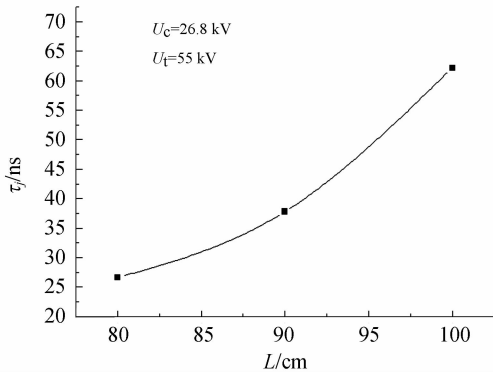


图 4 放电抖动随放电间隙长度的变化

Fig. 4 Discharge jitter vs. discharge gap length

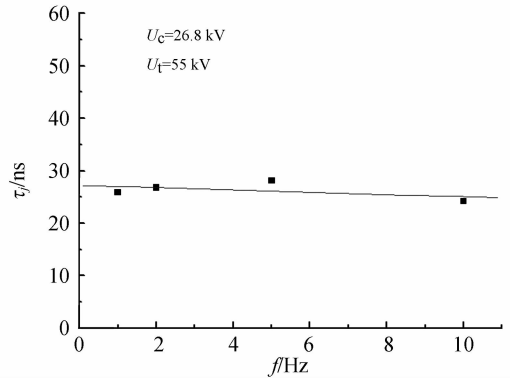


图 6 放电抖动随重复频率的变化

Fig. 6 Discharge jitter vs. pulse repetition rate

kV 时,  $\tau_j-U_t$  曲线相对平坦, 触发电压从 47 kV 增至 63 kV, 放电抖动变化不到 15 ns。主要原因为: 增大触发电压, 电极表面附近的畸变电场增大, 泵浦源的预电离效果变好, 放电抖动变小; 当预电离效果达到某一程度后, 泵浦源形成放电的时间趋于稳定, 继续增大触发电压, 对放电抖动的影响较小。

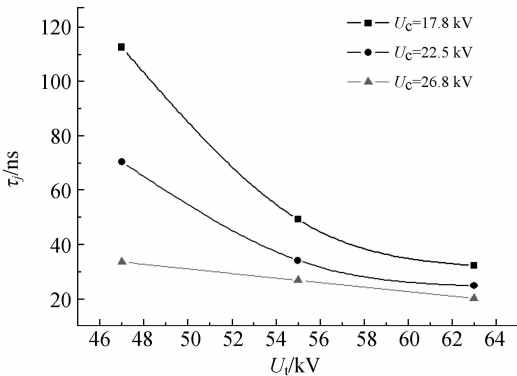


图 5 不同触发电压的放电抖动

Fig. 5 Discharge jitter vs. trigger pulse voltage

图 6 是在充电电压为 26.8 kV, 混合气体气压为 100 kPa, Ar : N<sub>2</sub> = 3 : 2, 触发电压为 55 kV, 放电间隙长 8 cm 条件下, 不同重复频率的放电抖动曲线。重复频率的变化基本不影响泵浦源模块的放电抖动, 重复频率从 1 Hz 升高到 10 Hz, 模块的放电抖动在 26 ns 左右。主要原因是: 实验的频率较低, 仅为 1~10 Hz, 每个脉冲的间隔时间相对于放电脉冲(微妙级)而言很长, 放电通道有足够长的时间进行绝缘恢复。

### 4 辐射稳定性

泵浦源的辐射强度波动  $\sigma$  定义为泵浦源模块重频运行过程中, 放电辐射光强与其平均值之差的极值与该平均值之比, 如下式:

$$\sigma = \frac{\max |I_n - I_a|}{I_a} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $I_n$  为泵浦重频运行中第  $n$  次放电的辐射光强,  $I_a$  为平均放电辐射光强。

图 7 给出了不同条件下泵浦源模块重频放电 30 个脉冲的放电辐射强度波动, 实验条件为放电腔室中混合气体气压为 75~125 kPa、泵浦源模块的充电电压为 17.8~26.8 kV 和重复频率为 1~10 Hz。图中表明, 在上述实验条件下, 改变混合气体气压和重复频率基本不影响泵浦源模块放

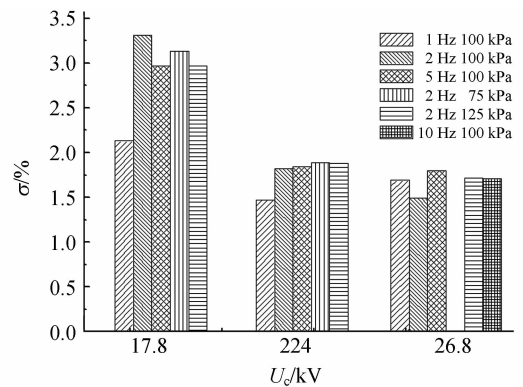


图 7 泵浦源的放电辐射强度波动随充电电压、混合气体气压和重复频率的变化

Fig. 7 Deviation of radiation intensity vs. pulse repetition rate, gas pressure and charging voltage, respectively

电辐射强度波动,辐射强度波动主要与充电电压相关。增加模块充电电压,泵浦源辐射强度波动减小,稳定性变好。当充电电压达到 22.4 kV,模块重频放电的辐射强度波动小于 2%,泵浦源辐射强度幅值稳定性较好。

## 5 结 论

本文研制了重频表面放电光泵浦源模块,研究了不同条件下泵浦源模块的重频运行稳定性。结果表明,重复频率为 1~10 Hz 时,泵浦源的放

电抖动主要受充电电压、触发电压和放电间隙长度的影响,随运行频率的变化较小。增大充电电压和触发电压,减小放电间隙长度,有利于减小泵浦源的放电抖动。辐射强度波动主要与充电电压相关,改变混合气体气压和重复频率基本不影响泵浦源放电辐射强度波动,增加充电电压,泵浦源辐射强度波动减小。当充电电压达到 26.8 kV,触发电压大于 55 kV,放电间隙为 8 cm 时,泵浦源的放电抖动小于 30 ns;辐射强度波动优于 2%。研究结果表明该光泵浦源的重频运行稳定性良好。

## 参考文献:

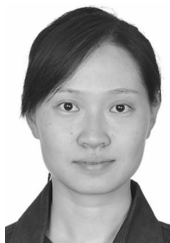
- [1] YU L, LIU J R, MA L Y, *et al.*. 10 J energy-level optically pumped XeF(C-A) laser with repetition mode[J]. *Optics Letters*, 2007,32(9):1087-1089.
- [2] 于力,朱峰,安晓霞,等. XeF 激光光谱研究[J]. *光学学报*, 2010,30(3):808-812.  
YU L, ZHU F, AN X X, *et al.*. Study on the spectrum of XeF laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010,30(3):808-812. (in Chinese)
- [3] TCHEREMISKINE V I, UTEZA O P, ARISTOV A, *et al.*. Optical sources based on a multichannel surface discharge and their application to pump photolytically driven femtosecond XeF(C-A) amplifier [J]. *SPIE*, 7005, 70051K.
- [4] TCHEREMISKINE V, UTEZA O, ARISTOV A, *et al.*. Photolytical XeF(C-A) laser amplifier of femtosecond optical pulses; gain measurements and pump efficiency [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2008,91(3-4):447-454.
- [5] KNECHT B A, FRASER R D, WHEELER D J, *et al.*. Compact XeF(C-A) and atomic iodine lasers optically pumped by radiation from a surface discharge[C]. *International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Laser*, 1995, 2619:8-13.
- [6] ARTEM'EV M Y, BASHKIN A S, MIKHEEV L D, *et al.*. NF<sub>3</sub>/H<sub>2</sub> and ClF<sub>5</sub>/H<sub>2</sub> chemical HF lasers initiated by radiation from a surface discharge [J]. *SPIE. XII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference*, 1998, 3574:385-396.
- [7] FULKER D J, CASE A D, VENNER M R W, *et al.*. An investigation into the optical emission from pulsed planar surface discharges and their application for the pumping of dye lasers [J]. *IEEE Pulsed Power Plasma Science*, 2001, 2:1543-1546.
- [8] BEVERLY R E III. Electrical gasdynamic, and radiative properties of planar surface discharges[J]. *Appl. Phys*, 1986, 60(1):104-124.
- [9] TUEMA F A, FOURACRE R A, MACGRGOR S J, *et al.*. An investigation of surface flashover across polymer and ceramic substrates[C]. *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2000:43-46.
- [10] FOURACRE R A, MACGREGOR S J, FULKER D J, *et al.*. Optical emission properties of pulsed surface discharges [J]. *IEEE. Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(5):1961-1966.
- [11] FULKER D J, FOURACRE R A, FINLAYSON A J, *et al.*. Measurement of the time dependent impedance of pulsed planar surface discharges in a xenon cover gas[C]. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2002:546-549.
- [12] 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.  
YU L, YI A P, LIU J R, *et al.*. Study on deposition efficiency of sectioned surface discharge[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(3):209-211. (in Chinese)
- [13] YU LI, AN XIAO-XIA, MA LIAN-YING, *et al.*. Experimental study on the surface discharge optical pumping source with high repetition mode [C]. *XVII International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers and High power Lasers SPIE*, 2008, 7131 71310L.

## 作者简介:

黄超(1979—),男,重庆万州人,助理研究员,2002年于四川大学获学士学位,2009年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用和脉冲功率技术方面的研究。E-mail: antelopehuangchao623@126.com

刘晶儒(1945—),女,辽宁沈阳人,研究员,博士生导师,1967年毕业于哈尔滨工业大学,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: liujingru2k3@vip.sina.com

于力(1969—),男,陕西西安人,博士,副研究员,1991年于陕西师范大学获学士学位,1998年、2007年于西北核技术研究所分别获硕士和博士学位,现主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: yuli057@163.com



马连英(1966—),女,陕西三原人,副研究员,1989年于清华大学获学士学位,2000年于西北核技术研究所获硕士学位,现主要从事机械设计和脉冲功率技术方面的研究。E-mail: yzima@163.com

安晓霞(1978—),女,山西五台人,工程师,2002年于四川大学获学士学位,现主要从事脉冲功率技术方面的研究。E-mail: annaaxx519@163.com

朱峰(1983—),男,湖北襄樊人,2005年于武汉大学获学士学位,2008年于西北核技术研究所获硕士学位,现主要从事气体激光技术方面的研究。E-mail: laser114@163.com

## ●下期预告

## 闭环电容式微加速度计全差分 CMOS 接口电路

刘晓为,尹亮,李海涛,周治平

(哈尔滨工业大学微电子技术与科学系,黑龙江哈尔滨 150001)

为了满足高精度微加速度计系统的应用要求,提出了一种用于电容式微加速度计的低噪声、高线性度的全差分接口电路。本电路基于开关电容技术检测,采用了一种新的双路反馈结构来提高系统线性度。采用  $2\ \mu\text{m}$  N 阱 CMOS 工艺完成了芯片设计。仿真结果证明,电路中采用的双路反馈和全差分检测结构使系统达到  $0.01\%$  的线性度。加入经过优化设计的比例-微分-积分控制器后,系统稳态误差得到了有效减小,系统响应速度提高了  $31\%$ ,系统线性度提高了  $66.7\%$ 。在  $\pm 5\ \text{V}$  工作电压下,选取  $64\ \text{kHz}$  作为电路采样频率,测试结果显示:电路等效输入噪声为  $8\ \mu\text{g}/\text{Hz}$ ,系统灵敏度  $1.22\ \text{V}/\text{g}$ ,线性度  $0.03\%$ ,测量范围为  $\pm 2\ \text{g}$ 。测试结果表明,本文电路达到高精度微加速度计系统设计的要求,可以应用到地震监测、石油勘探等领域中。