

陶瓷表面放电光泵浦源放电特性研究

黄超*, 马连英, 朱峰, 安晓霞, 于力, 刘晶儒

(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: 为了提高表面放电光泵浦源的寿命, 以 Al_2O_3 陶瓷作为放电基板, 研制了分段表面放电光泵浦源。基于放电电压和电流波形, 详细研究了泵浦源的放电周期, 放电通道电阻, 能量沉积效率和等离子体功率密度。发现泵浦源的放电周期、放电通道电阻和能量沉积效率均随放电间隙长度和混合气体气压的增大而变大, 随充电电压的增加而减小; 而等离子体功率密度主要取决于充电电压和放电间隙长度, 基本不随混合气体气压的改变而变化。在充电电压为 26.8 kV, 气压为 100 kPa, 放电间隙长 8 cm 的条件下, 泵浦源的能量沉积效率约为 82%, 等离子体功率密度达到了 9.36 MW/cm。实验研究表明: Al_2O_3 陶瓷表面放电光泵浦源具有良好的放电特性, 较同等条件下聚四氟乙烯表面放电光泵浦源的等离子体功率密度更高, 可产生更强的真空紫外辐射, 辐射亮度温度大于 23 kK。 Al_2O_3 陶瓷表面放电光泵浦源适用于光泵浦 XeF_2 气体形成大功率 $\text{XeF}(\text{C-A})$ 蓝绿激光。

关键词: 激光技术; $\text{XeF}(\text{C-A})$ 蓝绿激光; 光泵浦源; 分段表面放电; 能量沉积效率

中图分类号: TN248.5 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20191206.1321

Discharge characteristics of optical pumping source by ceramic surface discharge

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

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,

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

* Corresponding author, E-mail: huangchao@nint.ac.cn

Abstract: To obtain a lifetime of surface discharge optical pumping source, the sectioned-surface discharge optical pumping source with an Al_2O_3 ceramic substrate is developed. Based on the discharge voltage and the discharge current waveforms of a pump source, the discharge period, the discharge channel resistance, the energy deposition efficiency and the average power density of discharge plasma are investigated in detail under different conditions. The discharge period, the discharge channel resistance and the energy deposition efficiency increase with an increase in the length of the discharge gap and the pressure of the mixed gas. A trend toward the opposite is observed as the charging voltage increases. The average power density of discharge plasma

收稿日期: 2018-12-05; 修订日期: 2019-02-02

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金项目 (No. SKLLIM1011-01)

Supported by State Key Laboratory Foundation of Laser Interaction with Matter (No. SKLLIM1011-01)

mainly depends on the charging voltage and the length of the discharge gap but is almost unaffected by the gas pressure. Normally, the energy deposition efficiency can be more than 82% and the average power density of discharge plasma is 9.36 MW/cm when the charging voltage is 26.8 kV, the discharge gap length is 8 cm, and the gas pressure is 100 kPa. The experimental results show that Al_2O_3 ceramic surface discharge optical pump source performs good discharge characteristics, and has a higher average discharge plasma power density than Teflon surface discharge optical pumping source under the same conditions, which results in a better vacuum ultraviolet radiation intensity and a brightness temperature above 23 kK. An Al_2O_3 ceramic surface discharge optical pumping source is appropriate for optical pumping XeF to obtain a high power XeF (C-A) blue-green laser.

Key words: laser technology; XeF (C-A) blue-green laser; optical pumping source; sectioned surface discharge; energy deposition efficiency

1 引言

表面放电生活中广泛存在,是现阶段倍受关注的研究内容之一,它在高电压设备绝缘结构设计^[1-5]、表面冷却^[6]、食物杀菌^[7]、气体处理^[8]、臭氧生成^[9]、材料处理、表面清洁、紫外预电离和紫外光泵浦激光等方面^[10-12]有着广泛的应用需求。特别地,利用表面放电研制的光泵浦源具有光电转换效率高、紫外辐射强和可对所需波段进行辐射增强等优点,常用于光泵浦产生大功率 XeF (C-A) 蓝绿激光^[11-12]。

XeF (C-A) 蓝绿激光器的波长为 450 ~ 520 nm,处于大气和水下传输窗口,且可获得重复频率大脉冲能量输出,是现阶段开展激光水下通信、探测与照明技术研究的重要相干辐射源之一;而相关研究和应用迫切需要蓝绿激光器实现高功率长寿命运行^[13]。目前 XeF (C-A) 蓝绿激光器采用聚四氟乙烯表面放电光泵浦源,由于这种光泵浦源的抗烧蚀性能差,大大限制了 XeF (C-A) 蓝绿激光器的使用寿命,不利于激光器开展水下通信、探测与照明技术的研究和应用。

陶瓷材料具有电气绝缘度高,耐腐蚀性好,熔点高、抗烧蚀,紫外辐射强等特点,是长寿命表面放电基底材料的首选。国外对陶瓷表面放电辐射源进行了广泛研究,典型报道有,1986 年 Beverly III 等人对比研究了包括陶瓷在内多种材料的表面放电电学特性、气体动力学特性和辐射特性^[14],研究结果表明陶瓷表面放电具有明显的紫外增强

效应。1994 年,英国 Scott 等人研制了用于形成 X 射线预电离的表面放电源,其重复频率可达到 2.4 kHz,但是放电面积较小,约为 400 mm × 10 mm^[15]。1997 年,美国 Los Alamos 国家重点实验室 Robert 研究小组报道了用于材料处理的大面积表面放电紫外辐射源,该辐射源采用陶瓷作为放电基底^[16]。2000 年, Tuema 等人研究了 BaTiO_3 陶瓷表面放电辐射源的光谱特性^[17]。2002 年, Fouracre 等人研究了蓝宝石表面放电辐射光谱,实验测得了从紫外到红外多个谱段的能量分布^[18]。2003 年,美国伊利诺斯大学 Knecht 等人应用线性稳定放电方式成功研制了 1 ~ 5 Hz 重复频率陶瓷表面放电光泵浦源,并用于光泵浦产生原子碘激光^[19]。国内学者对表面放电辐射源的研究主要采用聚四氟乙烯材料^[20-22],采用陶瓷材料的较少,有关陶瓷大功率表面放电光泵浦源放电特性的研究更鲜有报道。本文选用 Al_2O_3 陶瓷作为放电基板材料,研制了分段表面放电光泵浦源,并开展了放电特性实验研究。

2 实验装置

Al_2O_3 陶瓷分段表面放电光泵浦源的结构如图 1 所示,放电通道被分成两个独立的小段,每段放电间隙长度 l 为 8 ~ 10 cm 可调,每个通道对应的储能电容为 0.232 μF 。由于放电通道采用对称设计,每段放电通道的放电参数基本一致,因此本文以其中一段放电通道为代表,研究 Al_2O_3 陶瓷分段表面放电光泵浦源的放电特性。

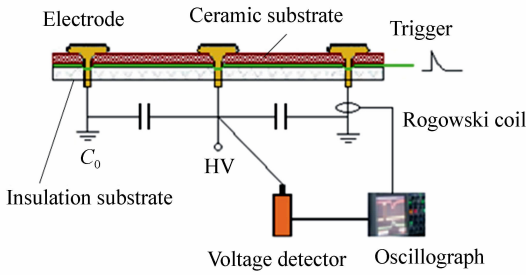


图1 陶瓷表面放电光泵浦源的结构示意图
Fig. 1 Structure schematic of surface discharge optical pumping source with Al_2O_3 ceramic substrate

kPa 时不同充电电压条件下表面放电光泵浦源的实验波形,其中(a)为放电电压波形,(b)为放电电流波形。

3 实验结果与分析

3.1 放电周期

不同实验条件下泵浦源的放电周期如图3所示。从图中可知,放电周期随充电电压的升高而减小,随气压的增大而增大,随放电间隙长度的增长而变大。在间隙为8 cm 情况下,电压为13.5 kV 时,气压从50 kPa 变到125 kPa,泵浦源放电周期变化约为0.25 μs 。随着充电电压的升高,气压变化对泵浦源放电周期的影响逐渐减小,充电电压达到26.8 kV 时,气压从50 kPa 变到125 kPa,放电周期变化不到0.1 μs 。分析认为在电容值一定的条件下,泵浦源的放电周期主要由回路的电感决定,而回路电感又取决于放电等离子体和回路结构。当回路结构不改变时,回路电感的变化主要与放电等离子体有关。不同充电电压和气压条件下放电等离子体照片见图4,图中放电通道长8 cm。当仅增大充电电压时,放电回路结构不变,但是放电等离子体会迅速膨胀,放电等离子体的电感减小,致使放电回路电感减小,因此放电周期变小。而增大气压则限制了放电等离子体的膨胀,从而使放电等离子体的电感增大,放电回路电感变大,因此放电周期变大。增大放电间隙长度,回路面积变大,回路的结构电感变大,故放电周期变大。

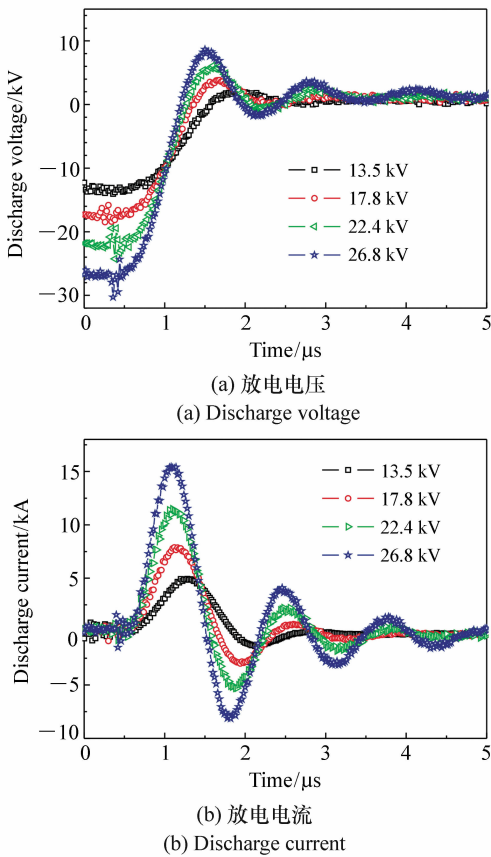


图2 放电光泵浦源的放电电压和电流波形
Fig. 2 Voltage and current waveform for surface discharge optical pumping source

实验中泵浦源的工作电压 U_0 为13.5 ~ 26.8 kV, 氩氮混合气体 ($Ar:N_2 = 3:2$) 气压 p 为50 ~ 125 kPa。利用PVM-5型高电压探测器监测泵浦源的放电电压,其分压比为1 000:1。利用罗可夫斯基线圈测量泵浦源的放电电流,其灵敏度为1 350 A/V。图2为放电间隙为8 cm、气压为100

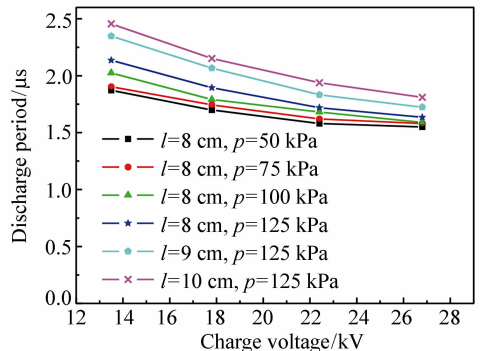


图3 放电周期随电压、间隙和气压的变化
Fig. 3 Discharge period varies with charge voltage, discharge gap and pressure of mix gas

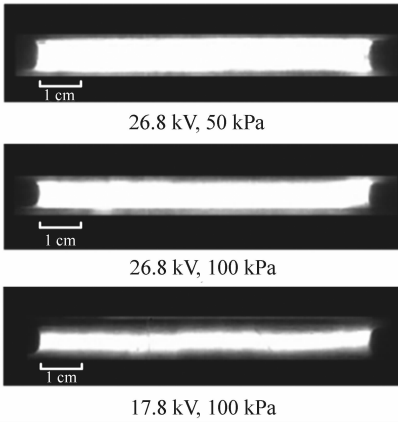


图 4 放电等离子体照片

Fig. 4 Image of discharge plasma for surface discharge source

3.2 放电通道电阻

放电通道的阻抗是表面放电泵浦源的重要电

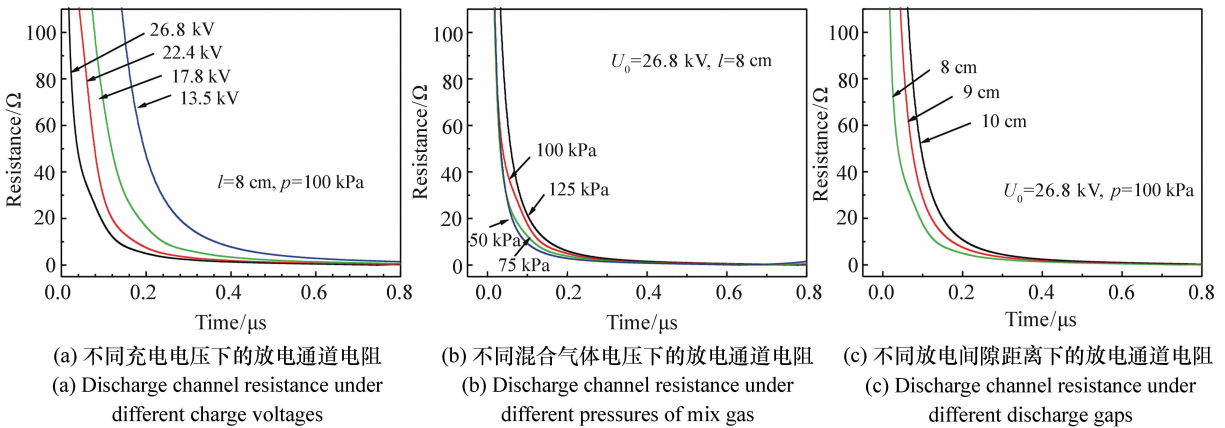


图 5 不同条件下的放电通道电阻

Fig. 5 Discharge channel resistance under different conditions

3.3 放电电流上升陡度

表面放电光泵浦源的放电电流上升陡度定义为放电电流峰值除以四分之一周期。不同条件下放电电流上升陡度如图 6 所示。图中表明增大充电电压、减小混合气体气压和放电间隙长度,均有利于提升表面放电光泵浦源的放电电流上升陡度。由实验结果可知增大充电电压、减小混合气体气压和放电间隙长度,均使得放电通道的电阻变小,从而增大放电电流;同时,增大充电电压、减小混合气体气压和放电间隙长度,将致使放电周期变小,因此放电电流上升陡度变大。

学参量,反应通道的导通状态。在放电回路中,除放电通道外其它部件的电阻之和为几个毫欧,可忽略;另外,在放电过程中可近似认为回路的电感不变,因此泵浦源放电通道电阻可由式(1)计算,

$$R(t) = \frac{u(t) - L \frac{di(t)}{dt}}{i(t)}, \quad (1)$$

式中 $u(t)$ 为放电电压, $i(t)$ 为放电电流, L 为放电回路电感 ($L = T^2 / (4\pi^2 C)$)。

图 5 为不同充电电压、间隙长度和总气压条件下半周期内放电通道电阻的变化曲线。从图中可以看出,在放电的开始时刻,通道的电阻很大,随着放电的进行,放电通道电阻迅速下降,并在低阻值状态下持续较长时间。提高充电电压、减小小气室气压和放电间隙距离,放电通道电阻下降加快,阻值减小,进而导致放电回路的等效电阻 R 减小。

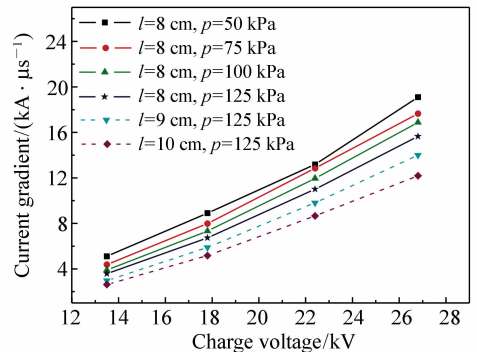


图 6 电流陡度随电压、间隙和气压的变化

Fig. 6 Current gradient varies with charge voltage, discharge gap and pressure of mix gas

3.4 能量沉积效率

泵浦源的能量沉积效率定义为第一个半周期内沉积到放电通道中的能量,可由式(2)计算得到。图7为不同条件下泵浦源的能量沉积效率曲线,从图中可知泵浦源的能量沉积效率随充电电压的增大而减小,随混合气体气压和放电间隙长度的增加而增大。能量沉积效率对充电电压更加敏感,充电电压为13.5 kV时,能量沉积效率均超过了95%,而充电电压增至26.8 kV时,能量沉积效率降至85%左右;其中气压100 kPa下8、9和10 cm 3种放电间隙的能量沉积效率分别为82.7%、85.6%和87.4%。

$$\eta = \frac{\int_0^{T/2} [u(t) - L \cdot \frac{di(t)}{dt}] i(t) dt}{\frac{1}{2} CU_0^2} \quad (2)$$

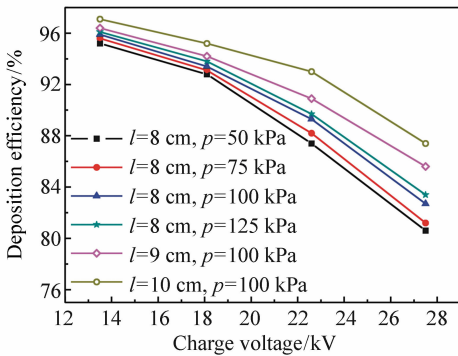


图7 能量沉积效率随电压、间隙和气压的变化

Fig. 7 Energy deposition efficiency varies with charge voltage, discharge gap and pressure of mix gas

泵浦源放电属于欠阻尼放电,放电回路阻尼系数 $\alpha = R(C/L)^{1/2}/2$ 。增大充电电压,放电通道电阻减小,回路电阻 R 也变小,而回路结构决定了电感变化很小,因此 α 减小,放电振荡周期增多,沉积在第一个半周期的能量减少,泵浦源的能量沉积效率降低。增大放电间隙长度,回路电阻和回路电感同时增大,但是 α 与回路电阻成正比,与 L 的平方根成反比,总的效果增大了放电回路的阻尼系数 α ,提高了放电回路的匹配程度,能量沉积效率增大。增大混合气体的气压,放电电阻增大,回路结构不变使得电感的变化很小,致使 α 变大,提高回路的匹配程度,从而增大了泵浦源

的能量沉积效率。

3.5 等离子体功率密度

等离子体功率密度定义为单位长度放电通道中的沉积功率,可由式(3)计算得出。不同条件下等离子体功率密度见图8。

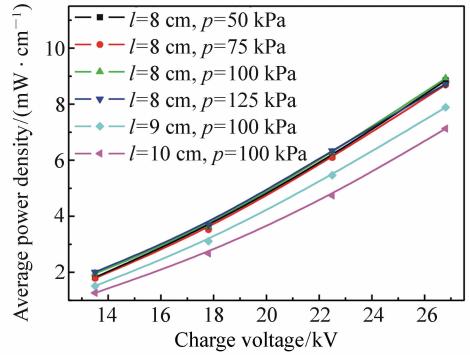


图8 等离子体功率密度随电压、间隙和气压的变化

Fig. 8 Average power density of discharge plasma varies with charge voltage, discharge gap and pressure of mix gas

充电电压越高、放电间隙越短,则等离子体功率密度越大。分析认为原因如下:在间隙长度和气压不变的条件下,增大充电电压,大幅度地提高了沉积在放电通道中的能量,同时减小了泵浦源的放电周期,因此提高了等离子体的功率密度;而在充电电压和气压不变时,减小间隙长度,尽管沉积在通道中的能量有所减少,但是间隙长度和放电周期同时减小,综合效果增加了等离子体的功率密度。还注意到气压变化对等离子体功率密度的影响很小,这是因为增大气压虽然增大了沉积在放电通道中的能量,但是同时也增大了泵浦源的放电周期,所以气压变化对等离子体功率密度的影响不大。在充电电压为26.8 kV,放电间隙为8 cm,气压为100 kPa的条件下,Al₂O₃陶瓷表面放电光泵浦源的放电等离子体功率密度达到了9.36 MW/cm,较相同实验条件下聚四氟乙烯表面放电泵浦源放电等离子体的功率密度8.87 MW/cm略高。

$$\frac{dp}{dx} \Big|_{\text{average}} = \frac{\int_0^{T/2} R(t) \cdot i^2(t) dt}{l \cdot T/2} \quad (3)$$

4 讨论

表面放电光泵浦源的紫外辐射源于放电等离子体,其紫外辐射亮度温度与放电等离子体的功率密度密切相关。聚四氟乙烯表面放电光泵浦源的紫外辐射亮度温度与放电等离子体功率密度的关系可由文献[20-21]中的数据拟合给出,如图9所示。从图中可知表面放电光泵浦源紫外辐射亮度温度随放电等离子体功率密度的增加而增大。当放电等离子体功率密度为 9.36 MW/cm^2 , 聚四氟乙烯表面放电泵浦源的紫外辐射亮度温度约 23 kK 。文献[22]研究表明 Al_2O_3 陶瓷表面放电光泵浦源具有紫外增强效应,相同功率密度下,较聚四氟乙烯具有更强的紫外辐射,故 Al_2O_3 陶瓷表面放电光泵浦源的紫外辐射亮度温度高于 23 kK 。

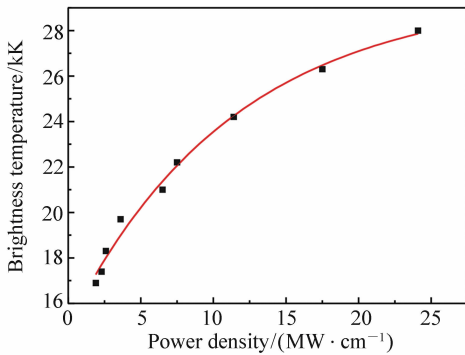


图9 辐射亮度温度随放电等离子体功率密度的变化情况

Fig.9 Radiation brightness temperature varies with average power density of discharge plasma

高的放电等离子体功率密度是表面放电光泵浦源获得高紫外辐射亮度温度的前提基础。这就要求表面放电过程在短时间内将尽可能多的能量沉积到放电等离子体中。首先要一个快放电过程,快放电过程同时有利于形成大的放电电流上升陡度,这与文献[14]中表面放电光泵浦源的紫外辐射亮度与放电电流上升陡度正相关这一研究结果一致。前述研究发现,提高表面放电光泵浦源的充电电压、减小放电间隙距离,可以压缩泵浦源的放电周期,加快放电通道的导通速度,可使放

电通道的阻抗迅速减小,从而大幅度提升放电电流的上升陡度,同时增加表面放电等离子体功率密度。然而降低气压虽提升了放电电流的上升陡度但并不能增加表面放电等离子体的功率密度。其次,要实现高的能量沉积。而能量沉积效率与泵浦源的放电结构密切相关,当前泵浦源运行在欠阻力模式,且泵浦源的结构还不匹配,通过结构优化,能量沉积效率还能进一步提升。若不降低脉冲储能,则应尽可能减小回路电感,可以采用更紧凑的回路结构和更小电感的电容。最后,还需要高的储能。高储能通常采用高电压或大电容实现,但是太大的电容会加大泵浦源电路匹配的难度,因此,在适合的电容下选择高电压获得高储能更适用于表面放电泵浦源。

另外,表面放电等离子体属于高温高压等离子,发射光波长越短,透明性越好,这就呈现出可见光及以上长波由放电等离子体外围辐射,紫外辐射主要由放电等离子体中心区辐射。快速膨胀是放电等离子体的固有特性,功率密度越大,其膨胀越迅速、膨胀半径越大,而膨胀将降低等离子体中心温度,不利于形成高效强紫外辐射。因此,表面放电光泵浦源应尽可能限制放电等离子体的膨胀,让放电等离子体的中心保持高温状态,可通过设计特定放电结构和外加磁场等措施实现。

5 结论

通过对 Al_2O_3 陶瓷表面放电光泵浦源的放电特性研究,获得了放电周期、放电通道电阻、能量沉积效率和等离子体功率密度等参数随充电电压、放电间隙长度和气压的变化规律。当充电电压为 26.8 kV , 气压为 100 kPa , 放电间隙长为 8 cm 条件下,泵浦源的能量沉积效率大于 82% , 放电等离子体功率密度达到了 9.36 MW/cm^2 。

Al_2O_3 陶瓷表面放电光泵浦源的放电等离子体功率密度较相同实验条件下聚四氟乙烯表面放电泵浦源的放电等离子体功率密度略高。根据聚四氟乙烯表面放电泵浦源的辐射亮度与放电等离子体功率密度曲线,结合 Al_2O_3 陶瓷表面放电光泵浦源的紫外增强效应,发现 Al_2O_3 陶瓷表面放

电光泵浦源的紫外辐射亮度温度可大于 23 kK, 其适用于大功率光泵浦 XeF(C-A) 蓝绿激光器。

参考文献:

- [1] 王永强,仲钊,谢军,等. 温度对不同老化程度的绝缘纸板沿面放电的影响[J]. 高电压技术,2017,43(8):2724-2732.
WANG Y Q,ZHONG ZH,XIE J,*et al.* Influence of temperature on the surface discharge of insulating paperboard with different aging degree[J]. *High Voltage Engineering*,2017,43(8):2724-2732. (in Chinese)
- [2] 赵玉顺,张桦,陈维江,等. 雷电冲击电压下环氧树脂基频率选择超材料沿面放电特性[J]. 电工技术学报,2017,32(20):10-19.
ZHAO Y SH,ZHANG H,CHEN W J,*et al.* . Analysis of surface discharge characteristics of a frequency selective metamaterial based on epoxy resin under lightning pulse voltage[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2017,32(20):10-19. (in Chinese)
- [3] 郑重,于志诚,杜赫,等. 液氮温区超导复合绝缘材料沿面放电特性[J]. 中国电力,2018,51(3):69-73.
ZHENG ZH,YU ZH H,DU H,*et al.* . Characteristics of surface discharge on the interface of solid insulation and liquid nitrogen in superconducting applications[J]. *Electric Power*,2018,51(3):69-73. (in Chinese)
- [4] 许芝龙,许健芳. 附着金属颗粒的绝缘介质沿面放电微观发展过程[J]. 绝缘材料,2018,51(7):65-71,76.
XU ZH L,XU J F. Micro development process of surface discharge of insulation medium with metal particles[J]. *Insulating Materials*,2018,51(7):65-71,76. (in Chinese)
- [5] QI H H,WANG H Y,SUN P,*et al.* . A comparative study of volume discharge versus surface discharge generated by nano-second pulses in airflow with wire-to-wire electrode[C]. Proceedings of the 13th AsiaPacific Conference on Plasma Science and Technology, Professional Committee of Plasma Science and Technology, China Mechanics Society, Donghua University,2016.
- [6] 周织建,聂伟荣,洪肇斌. 共面薄膜电极表面放电冷却技术[J]. 光学精密工程,2018,26(4):866-874.
ZHOU ZH J,NIE W R,HONG ZH B. Electrocooling technology based on surface discharge of thin coplanar flat electrodes[J]. *Opt. Precision Eng.*,2018,26(4):866-874. (in Chinese)
- [7] 潘春青,岳田利,王铁成,等. 气体沿面放电低温等离子体对扩展青霉孢子杀灭效果[J]. 食品科学,2017,38(21):1-7.
PAN CH Q,YUE T L,WANG T CH,*et al.* . Killing effect of low-temperature plasma generated by gas phase surface discharge on *Penicillium expansum* spores[J]. *Food Science*,2017,38(21):1-7. (in Chinese)
- [8] 孙路石,曾翌,袁旭东,等. 沿面型介质阻挡放电氧化 NO 的试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(4):68-72.
SUN L SH,ZENG ZH,YUAN X D,*et al.* . Experimental research on NO oxidization by surface dielectric barrier discharge[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*,2017,45(4):68-72. (in Chinese)
- [9] CAO Y,LI J,JIANG N,*et al.* . The structure optimization of gas-phase surface discharge and its application for dye degradation[J]. *Plasma Science and Technology*,2018,20(5):054018.
- [10] ARTEM'EV M Y,BASHKIN A S,MIKHEEV L D,*et al.* . NF₃/H₂ and ClF₃/H₂ chemical HF lasers initiated by radiation from a surface discharge[J]. *Proceedings of SPIE*,1998,3574:385-396.
- [11] YU L,MA L Y,YI A P,*et al.* . An optically pumped XeF(C-A) laser with repetitive rate of 10 Hz[J]. *Review of Scientific Instruments*,2012,83(1):013107.
- [12] YU L,ZHU F,SHEN Y L,*et al.* . A narrow linewidth and tunable XeF(C-A) laser[J]. *Laser Physics*,2013,23(8):085006.
- [13] 全向前,陈祥子,全永前,等. 深海光学照明与成像系统分析及进展[J]. 中国光学,2018,11(2):153-165.
QUAN X Q,CHEN X Z,QUAN Y Q,*et al.* . Analysis and research progress of deep-sea optical illumination and imaging

- system[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2):153-165. (in Chinese)
- [14] BEVERLY III R E. Electrical, gasdynamic, and radiative properties of planar surface discharges[J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 60(1):104-124.
- [15] SCOTT S J. Long-life 2kHz X-ray preioniser[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2206:16-24.
- [16] SZE R C. Large-area surface-discharge UV light source for materials processing applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 2987:88-93.
- [17] TUEMA F A, FOURACRE R A, MACGREGOR S J, *et al.*. An investigation of surface flashover across polymer and ceramic substrates[C]. Proceedings of 2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 2000:43-46.
- [18] 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.
- [19] KNECHT B A, FRASER R D, WHEELER D J, *et al.*. Optical pumping of the XeF(C→A) and iodine I. 315- μm lasers by a compact surface discharge system[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(12):3612-3621.
- [20] 易爱平. 多通道表面放电光泵浦源实验研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2002.
YI A P. Experimental study on optical pumping source with multichannel surface discharge[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002. (in Chinese)
- [21] 于力. 光化学激励大功率重复频率 XeF(C-A) 激光研究[D]. 西安:西北核技术研究所, 2007.
YU L. Study on the high power photochemical XeF(C-A) laser with repetition mode[D]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2007. (in Chinese)
- [22] 黄超, 刘晶儒, 于力, 等. 用于 XeF 蓝绿激光器的表面放电光泵浦源[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(8):081010.
HUANG CH, LIU J R, YU L, *et al.*. Surface discharge optical pumping source for XeF blue-green laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(8):081010. (in Chinese)

作者简介:



黄超(1979—),男,重庆万州人,硕士,助理研究员,2002年于四川大学获得学士学位,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方面的研究。E-mail:471356437@qq.com