

脉冲 HF 激光器预电离设计及效果评估

易爱平, 朱峰, 唐影, 马连英, 黄珂, 黄超, 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: 气体介质稳定体放电是放电激励气体激光器高效输出的基础和前提, 预电离是实现高压气体介质稳定体放电的有效技术途径之一。基于放电激励脉冲 HF 激光器电气结构总体设计要求设计了结构紧凑的紫外光自动预电离装置, 并对其在气体介质中预电离产生的初始电子数密度进行了数值模拟。模拟结果表明: 在整个放电区域内初始电子数密度均在 $10^9/\text{cm}^3$ 左右, 满足介质体放电要求。通过激光器能量输出实验评估了预电离效果, 对 SF_6 和 H_2 混合气体介质, 在充电电压较低时, 输出能量有数倍的提高; 对 SF_6 和 C_2H_6 混合气体介质, 在充电电压 20 kV 时激光器输出能量由 200 mJ 提高至 297 mJ, 提高了近 50%。实验结果表明: 该预电离装置对改善激光器能量输出特性有明显效果。

关键词: 预电离; 放电激励; HF 激光器; 体放电; 数值模拟

中图分类号: TN242 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0605005

Design and effects evaluation of pulsed HF laser preionization

Yi Aiping, Zhu Feng, Tang Ying, Ma Lianying, Huang Ke, Huang Chao, Yu Li, Liu Jingru

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

Abstract: Stable volume discharge of gas mixture is the foundation for discharge pumped gas laser, and preionization is one of effective solutions to stable volume discharge. The design of preionization pins of discharge-initiated pulsed HF laser was introduced, and preionization effects were evaluated by numerical simulation and experimental investigation. The simulation results show that the preionization electron density is about $10^9/\text{cm}^3$ in discharge area. The experimental results show that the output energy of laser with preionization is several times higher than that of without preionization in lower working voltage for $\text{SF}_6\text{-H}_2$ mixture, and for $\text{SF}_6\text{-C}_2\text{H}_6$ mixture, the output energy of laser increases from 200 mJ to 297 mJ with preionization and the charging voltage of 20 kV, which is about 50% higher than that of without preionization. The simulation and experimental results show that preionization has effects on controlling and maintaining volume discharge and improving the uniformity of discharge.

Key words: preionization; discharge-initiated; HF laser; volume discharge; numerical simulation

收稿日期: 2016-10-11; 修订日期: 2016-11-03

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1110)

作者简介: 易爱平(1969-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光技术及应用方面的研究。Email: yiaiping@nint.ac.cn

0 引言

中红外激光光源在激光医学、大气污染监测、泵浦产生太赫兹光以及光电对抗等领域有很好的应用前景^[1-2]。中心波长为 2.8 μm 的放电激励非链式 HF 激光是目前可实现较大能量输出的脉冲相干光源,并具有峰值功率高、光束质量好、结构紧凑等特点,在国际上受到广泛关注^[3-6]。

对于放电激励气体激光器,气体介质稳定体放电是实现高效输出的基础和前提。这里体放电形式为脉冲辉光放电,由于其电流密度较小,维持电压和放电通道阻抗较大,有利于能量在放电等离子体中的沉积,激励过程产生的激光增益较为均匀,能量提取效率高。反之,电弧放电流密度大,通道小,电极两端的维持电压较低,相应的通道放电阻抗较小,能量沉积效率及提取效率都很低。激光器高压运行时,气体密度大,气体分子的平均自由程小,击穿电压高,这增加了气体辉光的难度,而对含强电负性气体分子的激光介质气体(如 HCl、SF₆、NF₃、F₂ 等)实现辉光放电难度更大,因而在高压下如何实现介质的稳定体放电是放电激励激光研究中急需解决的关键技术问题^[7-11]。

预电离是实现高压气体介质稳定体放电的有效技术途径之一。其作用是在主放电开始前或过程中使部分气体介质电离,产生一定数密度的自由电子,从而在放电电极间隙电压上升时弥补阴极附近由于漂移、复合、形成负离子(附着)等引起的电子损耗,有效减小自持放电的形成时间,抑制流注(电弧放电)的形成。目前发展的预电离方式主要有紫外光预电离(包括紫外自动预电离、紫外激光预电离、表面放电预电离)和 X 射线预电离。一般说来,紫外预电离适用于电极间隙较小,气压相对较低的激光器,而 X 射线预电离则更适用于大间隙距离和相对高压,以产生大的能量输出。

对预电离方式的选择,主要应根据激光器输出性能、泵浦电路结构及器件电气绝缘要求等进行综合考虑。文中主要介绍了一种应用于放电激励脉冲 HF 激光器的结构紧凑型紫外自动预电离装置,对其预电离产生的电子数密度进行了数值模拟,并通过激光器能量输出实验验证了预电离应用效果。

1 实验装置

放电激励脉冲 HF 激光器实验装置采用 C-C 转移型电路设计,横向放电结构,装置示意图如图 1 所示。放电电极为一对不锈钢材料加工的长 480 mm、宽 26 mm 的条形电极,电极间距 15 mm,有效增益区域 460 mm×12 mm×15 mm。储能电容由 11 个 5.6 nF 的陶瓷电容并联组成,工作电压 20~30 kV。为获得稳定体放电,装置中采用了火花隙紫外自动预电离方式。48 对预电离针沿电极长度方向均匀布放于上电极两侧,与电极间隔 2 mm,构成预电离火花隙,每两根预电离针之间的距离为 2 cm。每对预电离针通过插拔结构与一个容量约 400 pF 的峰化电容串联。放电电极和预电离针由绝缘板隔离并与放电腔外的充放电回路相连,通过密封圈和紧固螺母固定以确保激光气室良好的真空密封性能。

激光器运行时,储能电容的电能经由电极引杆加载至电极上,并形成脉冲高压。由于预电离间隙仅为 2 mm,在放电电极加载脉冲高压时预电离间隙会快速击穿,并向峰化电容充电,同时预电离间隙形成的弧光放电通道持续辐射高强度紫外光,辐照主电极间隙中的激光气体介质,实现介质的紫外光自动预电离。预电离火花隙紧邻放电区,预电离放电产生的紫外光辐照主放电区域气体介质的利用效率较高。

上述预电离针设计的结构非常紧凑,放电回路电感小,放电效率高,并易于实现预电离针与激光器其他部件的电气绝缘。此外,预电离针与放电电极处于同一平面内,预电离结构布局不会对循环气体的流场结构造成任何影响,非常适合于器件的重复频率工作模式。

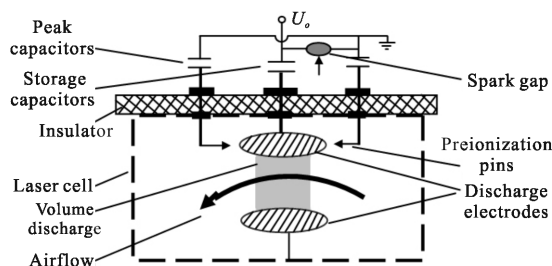


图 1 激光器装置结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser setup

2 预电离数值模拟

预电离对体放电形成的效果主要是通过放电区初始电子密度体现,因此在模拟中主要关注预电离放电产生的初始电子密度,并以此作为判据对紫外预电离效果进行评估。激光气体介质为 SF_6 和 H_2 气体,考虑光子能量为 $5\sim 10\text{ eV}$ 的紫外光,由于 H_2 的光电离截面和光吸收截面(约为 $4\times 10^{-24}\text{ cm}^2$)远小于 SF_6 的光电离和光吸收截面(约为 $3.24\times 10^{-18}\text{ cm}^2$),对模拟过程的影响可以忽略。模拟时考虑的紫外预电离过程主要包括 SF_6 分子的光电离和光吸收、 SF_6^+ 和电子的复合、 SF_6 吸附自由电子形成 SF_6^- 以及 SF_6^- 解离成为 SF_6 和自由电子等。图 2 为简化的激光器预电离结构示意图,其中 y' 轴为放电区域中心轴,也是激光器的光轴。在构建预电离模型时,将 48 对预电离针发射的紫外光简化为 48 个点光源,点光源强度根据峰化电容充放电电流估算最大约为 $0.8\times 10^3\text{ W/cm}^2$ 。

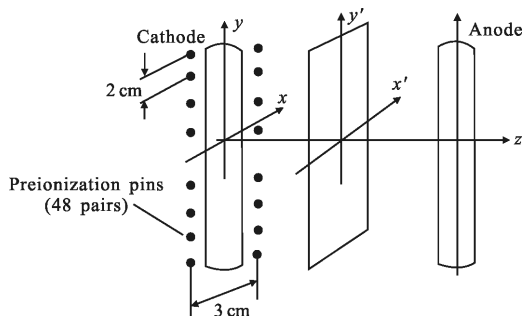


图 2 简化的激光器预电离结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser preionization layout

图 3 是 SF_6 气压为 50 kPa ,在储能电容对峰化电容充放电时,预电离在距离阴极平面 0.5 cm 处,沿光轴方向距离光轴不同位置处产生的初始电子数密度分布。可以看出,光轴位置($x=0\text{ cm}$)初始电子数密度最小,约 $0.9\times 10^9/\text{cm}^3$ 。而距离光轴越远,此时越靠近一侧的预电离针,则初始电子数密度越大,在电极形成的电场分布较均匀的区域边缘($x=0.6\text{ cm}$),初始电子数密度大于 $1.0\times 10^9/\text{cm}^3$,平均约 $1.1\times 10^9/\text{cm}^3$ 。图 4 表示的是 $x=0.6\text{ cm}$ 处距离阴极表面不同位置的初始电子数密度分布。由图可知,越靠近阴极表面,初始电子数密度越大,阴极表面处初始电子数密度大于 $1.3\times 10^9/\text{cm}^3$ 。

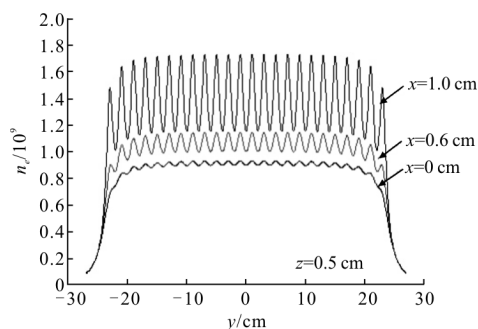


图 3 距光轴不同距离预电离电子密度分布

Fig.3 Distribution of preionization electron density at different distance from axis

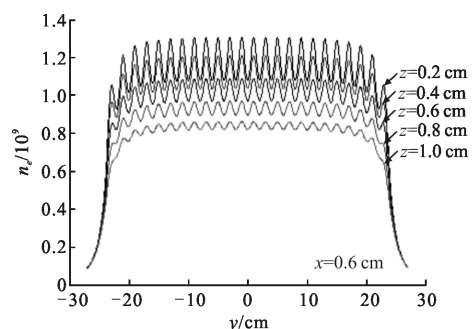


图 4 距阴极表面不同距离预电离电子密度分布

Fig.4 Distribution of preionization electron density at different distance from surface of cathode

SF_6 气压为 20 kPa 时,预电离在距阴极表面 0.5 cm 处电场分布较均匀的区域产生的初始电子数密度二维分布如图 5 所示。可以看出,光轴位置电子数密度最小,区域边缘最大,且与预电离针对应产生类似周期性分布,在整个区域内预电离产生的初始电子数密度均超过 $10^9/\text{cm}^3$ 。

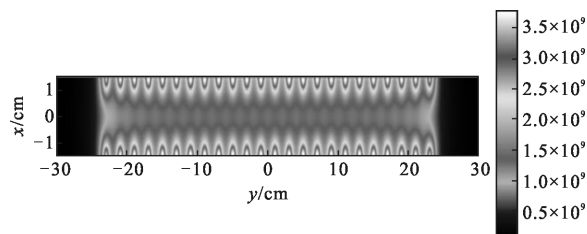


图 5 距阴极平面 0.5 cm 处预电离电子密度二维分布

Fig.5 Planar distribution of preionization electron density at the distance of 0.5 cm from surface of cathode

模拟结果表明: SF_6 气体的分子数密度对预电离效果有较大影响,但对该 HF 激光装置, SF_6 气体压力为 50 kPa ,预电离仍可以形成初始电子数密度约

$10^{10}/\text{cm}^3$ 的空间分布。而在激光器正常工作气压 10~20 kPa 范围内,预电离初始电子数密度超过 $10^{10}/\text{cm}^3$, 预电离效果较为明显, 表明对体放电的形成具有积极作用。

3 预电离效果实验评估

在图 1 中将预电离针与上电极短接, 其他电路结构不变, 就可以使得激光器不再具有预电离功能。通过对比研究有无预电离情况下激光器能量输出特性, 实验评估预电离效果。评估实验中分别研究了 SF_6 和 H_2 以及 SF_6 和 C_2H_6 两种混合气体介质, 其中 C_2H_6 对放电电弧有一定的抑制作用。

图 6 给出了激光器分别充入两种混合气体介质, 在有无预电离时输出能量随充电电压的变化情况。其中, 两种混合气体介质中 SF_6 分压均为 12 kPa。由图可知, 预电离对改善体放电、提高激光器输出能量有明显作用。对 SF_6 和 H_2 混合气体介质, 在充电电压较低时, 输出能量有数倍的提高; 当充电电压大

压可以有效改善体放电。其原因在于随着电极间隙脉冲电压的提高, 间隙电场增长速率大大提高, 有利于减小放电阴极表面电子发射热斑的形成时间, 并且先期形成的热斑及放电通道中 SF_6^- 负离子分解产生的二次电子向邻近介质辐射, 有利于其他阴极热斑的形成并扩散形成体放电, 这一机制与冷阴极二极管发射大面积电子束的机制相似。对 SF_6 和 C_2H_6 混合气体介质, 即使 C_2H_6 对放电电弧有抑制作用, 可以有效改善体放电, 但预电离效果仍然明显, 激光器输出能量在充电电压 20 kV 时由 200 mJ 提高至 297 mJ, 提高了近 50%。

4 结 论

为解决放电激励脉冲 HF 激光器气体介质稳定体放电技术问题, 设计了结构紧凑的紫外光自动预电离装置。对该装置在气体介质中预电离产生的初始电子数密度数值模拟结果表明: 在整个放电区域内初始电子数密度均在 $10^{10}/\text{cm}^3$ 左右, 满足介质体放电要求。实验对比研究了两种混合气体介质在有无预电离时激光器能量输出特性, 对 SF_6 和 H_2 混合气体介质, 在充电电压较低时, 使用预电离时输出能量有数倍的提高; 对 SF_6 和 C_2H_6 混合气体介质, 使用预电离时激光器输出能量在工作电压范围内均有明显提高, 在充电电压 20 kV 时, 激光器输出能量由 200 mJ 提高至 297 mJ, 提高了近 50%。实验结果表明: 设计的紧凑型预电离装置对改善激光器能量输出特性有明显效果。

参考文献:

- [1] Rickwood K R. A comparison of methods of electrically exciting small pulsed HF lasers suitable for medical applications[J]. *Opt Commun*, 1997, 136: 480-486.
- [2] Boris G B, German K V, Vladimir Y A. Recognition of composition and of microphysical characteristics of aerosol clouds in multifrequency sounding [C]//SPIE, 2002, 4539: 62-68.
- [3] Lacour B. Recent advances in pulsed HF/DF lasers[C]//SPIE, 2003, 5120: 521-528.
- [4] Apollonov V V, Belevtsev A A, Firsov K N, et al. Advanced studies on powerful wide-aperture non-chain HF (DF) lasers with a self-sustained volume discharge to initiate chemical reaction[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 5120: 529-541.

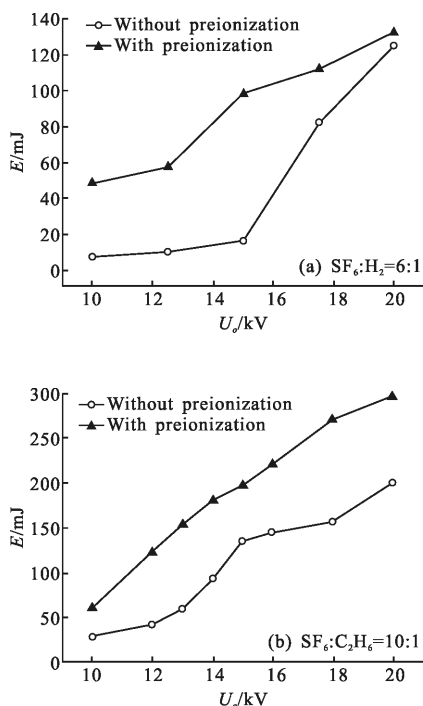


图 6 有无预电离时激光器输出能量比较

Fig.6 Comparison of output energy with or without preionization

于 15 kV 时, 无预电离时输出能量随电压的升高而快速增加, 但在 20 kV 时仍略低于使用预电离的情况, 表明无预电离时提高加载于电极间隙的脉冲电

- [5] Yi Aiping, Liu Jingru, Tang Ying, et al. Electrically initiated repetitive-pulsed non-chain HF lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 360–366. (in Chinese)
易爱平, 刘晶儒, 唐影, 等. 电激励重复频率非链式 HF 激光器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 360–366.
- [6] Ke Changjun, Sheng Yugang, Wan Chongyi, et al. Electric discharge nonchain pulsed HF laser[J]. *Laser Journal*, 2003, 22(6): 28–29. (in Chinese)
柯常军, 绳宇纲, 万重怡, 等. 放电激励的非链式脉冲 HF 激光器[J]. 激光杂志, 2003, 22(6): 28–29.
- [7] Lv Yan, Wan Chongyi. Study on the cathode surface preionization of TEA CO₂ lasers using PCB preionization[J]. *Laser Journal*, 2004, 25(6): 7–8. (in Chinese)
吕岩, 万重怡. 印刷电路板预电离 TEA CO₂ 激光器的阴极表面预电离研究[J]. 激光杂志, 2004, 25(6): 7–8.
- [8] Chen Bing. Several representative preionization technologies of TEA–CO₂ laser[J]. *Laser Journal*, 2003, 24(5): 33–35. (in Chinese)
陈冰. TEA–CO₂ 激光器的几种典型的预电离技术[J]. 激光杂志, 2003, 24(5): 33–35.
- [9] Luo Cong, Li Dianjun, Zhang Laiming, et al. Simulation of the ultraviolet pre-ionization in the mixture gas of non-chain HF laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2017–2022. (in Chinese)
骆聪, 李殿军, 张来明, 等. 非链式 HF 激光器紫外预电离的数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2017–2022.
- [10] Zhu Feng, Yi Aiping, Ye Xisheng, et al. Characteristics of SF₆ discharge in nonchain HF laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3297–3301. (in Chinese)
朱峰, 易爱平, 叶锡生, 等. 非链式 HF 激光器 SF₆ 气体介质放电特性[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3297–3301.
- [11] Huang Ke, Tang Ying, Yi Aiping, et al. Characteristics of non-chain discharge-pumped pulse HF laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1026–1029. (in Chinese)
黄珂, 唐影, 易爱平, 等. 非链式电激励脉冲 HF 激光器[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1026–1029.