

文章编号: 1001-3806(2008)02-0119-03

非链式脉冲 HF/DF 激光的新型引发技术

柯常军, 谭荣清, 吴 谨, 万重怡

(中国科学院 电子学研究所, 北京 100080)

摘要: 为了发展一种引发脉冲 HF/DF 激光器的新型放电技术。采用均匀粗糙表面的阴极在注入能量密度高达 200J/L 时仍可在激光介质中获得均匀稳定的体放电。优点是无需任何预电离, 且对电极面型无特殊要求。针-盘电极实验表明, 在非链式脉冲 HF/DF 激光介质中单通道放电表现为扩散均匀的辉光放电, 板-板电极的体放电从粗糙阴极开始, 阴极表面产生许多明亮的圆形亮点, 每一个亮点随后形成一条向阳极扩散的通道, 这些扩散的通道相互重叠形成了空间均匀的体放电。初步实验结果表明, 采用这种技术可以实现高能、高重复频率的脉冲 HF/DF 激光输出。

关键词: 激光器; 非链式 HF/DF 激光器; 自引发体放电; 无预电离

中图分类号: TN248.5 文献标识码: A

A new discharge type for non-chain pulsed HF/DF laser

KE Chang-jun, TAN Rong-qing, WU Jin, WAN Chong-yi

(Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences Beijing 100080, China)

Abstract A new approach has been brought forward to obtain glow discharge in non-chain HF/DF laser. It has been shown a volume discharge is forming in non-uniform electric field without preionization in SF₆ and C₂H₆ mixtures, the energy deposition up to 200J/L. The discharge in the pin-plane gap is a diffuse jet expanding towards the anode with a bright plasma domain at the cathode. The discharge in the plate-plate gap is presented with many diffuse channels attached to bright circular cathode spots that diverge towards the anode, with the channels overlapping form a spatially uniform glow discharge. The experimental results indicate that the new discharge type in SF₆ and C₂H₆ mixtures is promising for creation of high energy and high frequency HF/DF laser.

Key words lasers; non-chain HF/DF laser; self-initiated volume discharge; without preionization

引 言

自从 DEUTSH^[1] 1967 年首次采用纵向放电形式获得脉冲 HF 激光输出以来, 对放电引发的非链式脉冲 HF/DF 激光器已经开展了大量的实验和理论研究。非链式脉冲 HF/DF 激光器与链式 HF/DF 激光器相比, 没有爆炸和腐蚀的危险, 且能产生与之相当的高功率。到 1971 年, 放电引发非链式脉冲 HF/DF 激光器的最大输出能量仅为 170mJ。由于中红外波段的重要性, 上个世纪 90 年代末期, 国际激光界重新对非链式脉冲 HF/DF 激光器产生了浓厚的兴趣^[2-6]。为了进一步提高激光脉冲能量, 一方面寻求更好的工作介质, 到目前为止, SF₆ 被公认为是最佳的 F 原子施主, 最为常见的 H 原子提

供者为碳氢(氘)化合物、氢(氘)气, 最近的研究更倾向于用 SF₆ 和 C₂H₆(D₆H₁₂) 的混合气^[2]。另一方面由于 SF₆ 有很强的电负性, 对初始电子的强吸收, 传统的放电稳定技术(电阻限流、电晕预电离、火花预电离、半导体预电离、双放电等), 对于大放电体积, 难以奏效。最近, 俄罗斯的 APOLLONOV^[7] 研究小组采用自引发体放电 (self-initiated volume discharge, SMD) 的方法, 获得了脉冲能量大于 300J 的中红外激光输出。本文中通过两种不同的电极组合详细研究了非链式脉冲 HF/DF 激光器自引发体放电的形成机理, 实验结果表明, 在没有预电离的条件下, 在粗糙表面阴极的电极系统中仍可获得均匀的体放电, 注入能量密度高达 200J/L。同时给出了自引发体放电的电压电流特性测量结果。

1 实验装置

实验中采取的两种电极系统如图 1 所示, 图 1a 中的阴极为直径 0.5mm 的镍丝, 阳极为直径 10cm 的铝圆盘, 电极间距为 2.5cm。图 1b 中的电极为相同的平板, 长为 5cm, 宽为 2cm 的平板, 材料为硬铝, 平板边沿

基金项目: 国家安全重大基础研究资助项目 (5132802 26); 国家自然科学基金资助项目 (60708005)

作者简介: 柯常军 (1973-), 男, 副研究员, 主要从事高功率脉冲红外激光技术研究。

Email: ke675@sina.com

收稿日期: 2007-01-23 收到修改稿日期: 2007-03-21

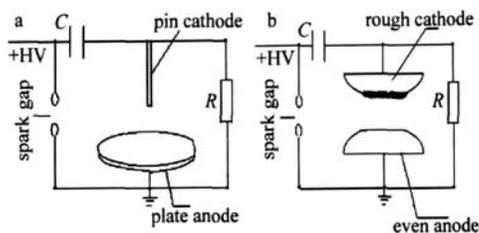


Fig 1 Schemes of experimental setups for studying the SMI dynamics
a— pin-plate electrodes b— plane-plane electrodes

经过半径为 0.5cm 倒角处理, 电极间距为 2cm, 与阳极不同的是阴极表面经过喷砂处理, 形成均匀粗糙的阴极表面。整个放电系统, 只有主放电电极, 没有预电离装置。激光混合气采用 SF₆ 和 C₂H₆, SF₆ 的纯度为 99.9%, C₂H₆ 的纯度为 99.95%。气体混合比 SF₆:C₂H₆ 的变化范围从 10:1 到 20:1, 总气压的变化范围为 3kPa~8kPa。为了获得放电随时间发展的信息还对放电电压、电流波形进行了测量。放电电压波形由 Tektronix P-6015A (1000^x) 高压探头测量然后到 Tektronix TDS3032B 双通道 300MHz 的示波器上显示, 放电电流由 Pearson 电流线圈 Model 6600 测量, 放电照片采用数码相机 (Cannon PowerShot A75) 拍摄。

2 实验结果

采用针-盘电极对放电来模拟单通道放电的过程, 图 2a 图 2b 中给出了不同注入能量下, 总气压 $p = 4 \text{ kPa}$ ($V(\text{SF}_6) : V(\text{C}_2\text{H}_6) = 20:1$) 的放电照片, 为了便于对比, 图 2c 是空气的放电照片。

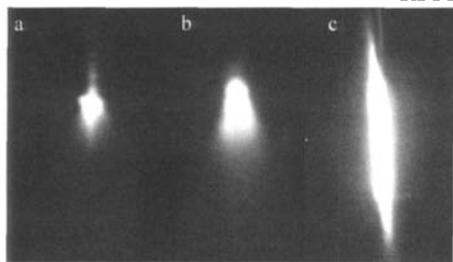


Fig 2 Discharging photographs of pin-plate electrodes
a— $C = 2.7 \text{ nF}$, $U = 12 \text{ kV}$ b— $C = 5.4 \text{ nF}$, $U = 12 \text{ kV}$ c— $C = 2.7 \text{ nF}$, $U = 12 \text{ kV}$, in air

针-盘电极实验表明在非链式脉冲 HF/DF 激光介质中单通道放电表现为扩散均匀的辉光放电。在 SF₆ 混合气中, 放电表现为杯状扩散辉光放电, 阴极表面形成明亮的等离子体, 放电朝阳极的发展过程中变成扩散的辉光放电, 且放电时形成的杯体积随注入能量的增大而增大, 没有形成弧光。而空气中的放电表现为明亮的火花通道。

采用板-板电极对, 利用含有粗糙表面阴极的非均匀场电极对, 在无预电离的条件下, 在很宽的 HF 激光混合气的气压范围内获得了自引发体放电。图 3 中给

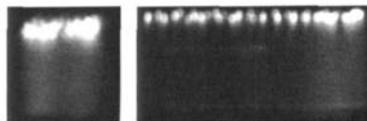


Fig 3 Photographs of SMI in mixture $V(\text{SF}_6) : V(\text{C}_2\text{H}_6) = 10:1$ $p = 5 \text{ kPa}$ the left photograph is taken through the axial direction the right one is taken through the side direction

出了典型的放电照片, 不难看出, SF₆ 混合气的自引发体放电的外貌与其它气体激光混合气的自持体放电照片有很大的不同, 而非均匀场的高气压 ($p_{\text{He}} = 607.95 \text{ kPa}$, $p_{\text{N}} = 303.975 \text{ kPa}$) 纳秒体放电相似^[8]。表现为体放电从粗糙阴极开始, 阴极表面产生许多明亮的圆形亮点, 每一个亮点随后形成一条向阳极扩散的通道, 这些扩散的通道相互重叠形成了空间均匀的体放电, 而不会出现弧光。可见电极边沿的非均匀电场对体放电的形成并未产生不利影响, 而阴极的粗糙表面对形成多通道放电起决定作用。在总气压 $p = 8 \text{ kPa}$ ($V(\text{SF}_6) : V(\text{C}_2\text{H}_6) = 10:1$), 注入能量 4 J ($U = 32 \text{ kV}$, $C = 8 \text{ nF}$) 的条件下得到了均匀的体放电, 注入能量密度高达 200 J/L 。

实验中发现, 电极间的击穿电压约为自引发体放电的准静态电压的两倍, 从图 4 的放电电压、电流波形中

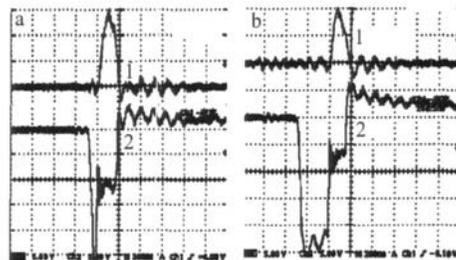


Fig 4 a— oscillograms of SMI current 1—500A/division and voltage 2—5kV/division in mixture $V(\text{SF}_6) : V(\text{C}_2\text{H}_6) = 10:1$ $p = 5 \text{ kPa}$ $C = 6 \text{ nF}$ b— oscillograms of SMD current 1—500A/division and voltage 2—5kV/division in mixture $V(\text{SF}_6) : V(\text{C}_2\text{H}_6) = 10:1$ $p = 3 \text{ kPa}$ $C = 4 \text{ nF}$

可以看出, 能量注入到放电等离子体发生在具有恒定电压的准静态阶段。由于没有外界触发电源, 电击穿的延迟时间从 50ns 到 400ns 变化, 如图 4a 中的延时为 70ns, 4b 中的延时为 300ns。放电区击穿后的准静态电压 U_q 只随 SF₆ 的气压而改变, 呈正比关系。C₂H₆ 的气压的改变对 U_q 没有影响, 发现准静态阶段单位 SF₆ 气压的电场强度值 E/p_{SF_6} 为常数, 等于 $88.8 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{Pa})$, 远高于 TEA CO₂ 激光 $10 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{Pa})$ 的 E/p 值^[9]。准静态阶段的恒定电压与电极间所加的初始电压 U , 储能电容无关, 只与电极间距和 SF₆ 的分气压有关, 放电电流脉冲的脉宽和幅值随储能电容的电荷量 $Q = CU$ 的增大而增大。

通过 $u(t)$ 和 $i(t)$ 相乘可以得到注入到放电等离子体中的电功率。图 5 中给出了注入电功率随时间的

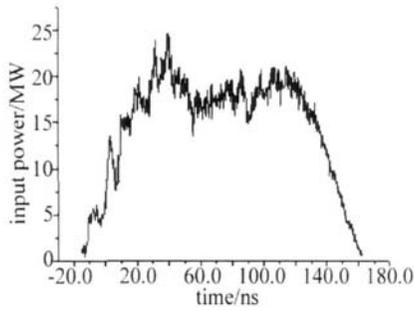


Fig 5 Dependence of input power on time in mixture $V(\text{SF}_6):V(\text{C}_2\text{H}_6) = 10:1$, $p = 5\text{kPa}$, $U = 28\text{kV}$, $C = 6\text{nF}$

变化情况,可以看到在大部分时间内注入功率均大于 15MW,注入到放电等离子体中能量约为 2.2J 而电容的初始储能为 2.35 J,能量从储能电容到放电等离子体的转化效率高达 90%。

3 讨论与结论

为什么具有粗糙阴极表面的非均匀电场中可以形成体放电?粗糙表面的凸点和 SF_6 的强电负性可以解释原因。当高压脉冲施加在电极对时,阴极表面的凸点上有更强的电场,因此这些电产生明亮的等离子体,同时由于 SF_6 的强电负性能限制电子雪崩的迅速发展。首先发生放电的阴极亮点对相邻的凸点产生预电离的作用,大量同样的过程在极短的时间发生。根据汤生理论,由于 SF_6 的强电负性对电子雪崩所起的限制作用,每一个亮点随后形成一条向阳极扩散的通道,这些扩散的通道相互重叠形成了空间均匀的体放电,避免了弧光的形成。

实验结果表明:(1)在没有预电离的条件下,采用具有粗糙阴极表面的非均匀电场,在 SF_6 混合气中获得均匀的体放电,注入能量密度高达 200J/L;(2)针-盘电极实验表明,在非链式脉冲 HF/DF 激光介质中单

通道放电表现为扩散均匀的辉光放电,板-板电极的体放电从粗糙阴极开始,阴极表面产生许多明亮的圆形亮点,每一个亮点随后形成一条向阳极扩散的通道,这些扩散的通道相互重叠形成了空间均匀的体放电;(3)能量注入到放电等离子体发生在具有恒定电压的准静态阶段,放电区击穿后的准静态电压 U_q 只随 SF_6 的气压而改变,呈正比关系。 C_2H_6 的气压的改变对 U_q 没有影响。

初步实验结果表明,由于不受预电离条件的限制,采用这种新型引发技术可以实现高能、高重复频率的脉冲 HF/DF 激光输出。

参 考 文 献

- [1] DEUTSCH T F. Molecular laser action in hydrogen and deuterium halides [J]. *Appl Phys*, 1967, 10(8): 234-236
- [2] KE CH J, WAN CH Y, ZHOU JW, *et al*. High peak power pulsed HF laser [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(5): 480-483 (in Chinese).
- [3] KALSKY Y, WAHMAN K, KAMINS S, *et al*. Plasma cathode preionized atmospheric pressure HF chemical laser [J]. *Opt Commun*, 1997, 137: 59-63
- [4] BAKSHI E H, PANCHENKO A N, TARASENKO V F. Discharge lasers pumped by generators with inductive energy storage [J]. *IEEE JQE*, 1999, QE 35(3): 261-266
- [5] AKSENOV Y N, BORISOV V P, BURTSEV V V. A 400W repetitively pulsed DF laser [J]. *Quantum Electron*, 2001, 31(4): 290-292.
- [6] BRUNET H, MABBU M, VOIGNIER F. High energy-high average power pulsed HF/DF chemical laser [J]. *Proc SPIE*, 1995, 2502: 388-392
- [7] APOLLONOV V V, FIRSOV K N, KAZANTESEV S Y. Scaling up of nonchain HF(DF) laser initiated by self-sustained volume discharge [J]. *Proc SPIE*, 2000, 3886: 370-381
- [8] TARASENKO V F, ALEKSEEV S D, GUBANOV V P, *et al*. Volume nanosecond high pressure discharge formed in a nonuniform electric field [J]. *Proc SPIE*, 2005, 5777: 531-534.
- [9] OSPOV V V. Self-sustained volume discharge [J]. *Physics-Uspekhi*, 2000, 43(2): 221-240
- [10] OKANO M, TANIGUCHI T, SAITO M. Residual aluminum and its dichroism in anodized alumina thin films [J]. *Opt Lett*, 1990, 15(5): 253-254.
- [11] SAITO M, SHIGA Y, MIYAGI M. Unoxidized aluminum particles in anodic alumina films [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1993, 140(7): 1907-1911.
- [12] SHEN B X, WAN G W, ZHAN H B. Multiwavelength interferometry for nanometer scale spacing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(1): 103-108 (in Chinese).
- [13] ZHANG DW, LI GH, SONG L K, *et al*. Study on the polarization interference spectrum of mica quarter-wave plates [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, 22(2): 195-197 (in Chinese).
- [14] LI G, SUN L Ch, YU Zh B, *et al*. Polarization effects in optical thin films [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(6): 647-651 (in Chinese).

(上接第 118 页)