

放电激励重复频率 HF 激光器稳定输出实验研究

唐 影 黄 珂 易 爱 平 朱 峰 马 连 英 于 力 黄 欣 沈 炎 龙 刘 晶 儒 叶 锡 生

(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 在放电激励重复频率气体激光研究中, 激光器重复频率运行能量稳定输出是提高其输出平均功率及其实用化的基础。利用实验室已建立的单脉冲输出能量焦耳级的放电激励重复频率脉冲 HF 激光装置, 通过调节气体介质循环速率及优化实验条件, 开展激光器重复频率运行稳定输出实验研究, 获得激光器重复频率运行时能量稳定输出的最佳工作条件。研究表明: 随着运行频率的上升, 激光输出能量衰减较快; 增大气体介质循环速率有利于改善放电稳定性, 提高激光器重复频率运行时输出能量稳定性。当混合气体工作介质以 3.5 m/s 的流速循环时, 激光器可实现 1~50 Hz 重复频率激光输出, 在重复频率 50 Hz 运行时稳定输出能量约 130 mJ, 能量波动约 5%。

关键词 激光器; 放电激励; 重复频率; 稳定性

中图分类号 TN248.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0202004

Experimental Study on Stable Output of Discharge-Pumped Repetition Rate HF Laser

Tang Ying Huang Ke Yi Aiping Zhu Feng Ma Lianying Yu Li Huang Xin
Shen Yanlong Liu Jingru Ye Xisheng

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

Abstract In the investigation of gas laser pumped by electric discharge, the stability of laser output energy in repetition rate mode is the foundation of increasing its output average power and its application in practice. By adjusting the velocity of gas flow and optimizing the operating condition of laser, the output energy stability of laser in repetition rate mode is studied experimentally with joule level discharged-pumped pulsed HF laser, and the optimal operating condition of laser is obtained. The experimental results show that laser output energy decreases quickly with the repetition rate increasing; and increasing gas circulating velocity is beneficial to improve the discharge stability and the stability of laser output energy in repetition rate mode. When the gas mixture circulates at 3.5 m/s flowing velocity, laser can operate at repetition rate from 1 Hz to 50 Hz and operating stability keeps well. Under these conditions, each laser pulse of 130 mJ is obtained stably, and the fluctuation of output energy is about 5%.

Key words lasers; discharge-pumped; repetition rate; stability

OCIS codes 140.3070; 140.4780; 140.5560; 140.6810; 140.1550

1 引 言

放电激励非链式脉冲 HF 激光具有峰值功率高、光束质量好、可实现高重复频率运行等优点, 其 2.7~3.1 μm 波段的宽谱带输出在激光化学、激光医学和半导体研究等领域具有广泛的应用前景, 近年来发展迅速。

在放电激励重复频率 HF 激光研究中, 激光器

重复频率运行能量稳定输出是实现其高平均功率输出及实用化的基础。影响激光器重复频率运行时输出能量稳定性的因素主要有放电稳定性、气体介质的消耗和反应产物对高能态 HF 分子的碰撞弛豫, 其中气体介质放电形式对能量沉积效率影响较大, 而能量沉积效率又决定着激光器输出能量和总效率, 因此气体介质均匀稳定放电是激光器重复频率

收稿日期: 2011-09-23; 收到修改稿日期: 2011-11-02

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM0902-2)资助课题。

作者简介: 唐 影(1974—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事激光技术方面的研究。E-mail: tang.y1012@163.com

运行能量稳定输出的重要研究内容。

近年来国内外对非链式 HF 脉冲激光器及其重复频率运行稳定输出开展了大量的研究^[1~11],取得了良好的进展。目前,B. Lacour 等^[2]成功研制了重复频率 HF 激光器,运行频率超过 10 Hz,单脉冲能量大于 20 J。H. Brent 等^[3]研制的放电激励 HF 脉冲激光器,其重复频率已大于 100 Hz,单次脉冲能量 10 J 以上,平均功率为千瓦量级。M. R. Harris 等^[4]研制的闭环重复频率 HF 激光器运行频率超过 1 kHz,但平均输出功率还较低,约为 10 W。国内开展非链式 HF 激光研究较晚,中国科学院电子所 2003 年利用放电激励已获得了 HF 激光输出,最大能量约 3 J^[7];2007 年实现 1.6 J/3 Hz 输出,但激光器重复频率运行稳定性仍较差^[8]。西北核技术研究所 2005 年开始进行重复频率非链式 HF 激光的研究工作,2006 年实现了电子束激励 30 Hz HF 激光的重复频率输出。2009 年研制成功了放电激励重复频率脉冲 HF 激光装置,实现了 50 Hz HF 激光输出,脉冲能量最高约 0.6 J^[9~10],但激光器在高重复频率运行时衰减较快,10 Hz 时输出能量约 200 mJ。本文主要介绍了利用现有 HF 激光装置,通过调节气体介质循环速率及优化实验条件开展气体介质均匀稳定放电及器件稳定输出实验研究情况。

2 实验装置

图 1 为放电激励高重复频率 HF 激光装置电路示意图。该激光装置采用紫外自动预电离电容转移型结构的电路设计。激光器工作时,高压电源对储能电容器 C(61.6 nF)充电,在储能电容充电至预定电压时,重复频率开关 S 在外触发高压的作用下导通,储能电容向峰化电容器 C_p(19.2 nF)充电,获得气体放电所需的快前沿脉冲高电压。同时位于激光间隙旁的预电离针在峰化电容充电时产生强紫外光,实现气体介质的紫外自动预电离,主电极间隙在

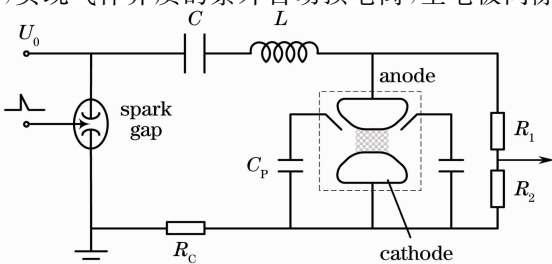


图 1 激光器电路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of discharge circuit

峰化电容形成的快前沿高电压作用下迅速击穿而形成放电。

激光气室采用箱体结构,箱体材料为不锈钢,气室尺寸长 64 cm、宽 20 cm、高 7 cm,其有效激活体积为 45 cm×1.4 cm×1.2 cm。激光器谐振腔采用内腔式稳定腔结构,其中后腔镜为曲率半径 3 m 的镀银全反镜,输出镜为 $\phi 50$ mm 的 CaF₂ 平面玻璃,图 2 为实验光学布局。在重复频率运行模式时,激光器处于闭环工作状态,气体循环系统由大功率轴流风机和气体循环管道组成闭环回路,风机转速可调,在常压下增益区截面的平均流速最大可以达到约 4 m/s。为了获得最佳的气体置换效率,气体流向、放电抽运方向和激光输出方向相互垂直,并且对气体注入段结构做了优化设计以获得均匀流场。

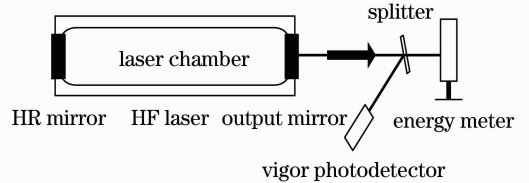


图 2 激光器输出特性实验光学布局

Fig. 2 Schematic diagram of the laser

电极间隙电压、放电电流是激光器放电性能诊断的重要参数。电极间隙电压用安装在激光器主电极间隙两端的电阻分压器测量,灵敏度 1 kV/V;放电电流用安装在主间隙放电回路的罗戈夫斯基线圈测量,灵敏度 3 kA/V。激光能量测量采用 Gentec 公司的 QE50-LP-H-MB 型能量计,能量计距离激光器平面输出镜 1.8 m;采用 VIGO 红外探测器(响应波长范围为 2.8~4.8 μ m)测量激光波形,中红外热像仪记录激光近场光斑的空间分布。

3 实验结果与分析

3.1 输出能量与气体介质放电的关系

以 SF₆ 和 C₂H₆ 混合气体为工作介质实验研究激光器重复频率条件下输出能量的稳定性。图 3 是示波器记录的单次脉冲放电过程中的典型电压电流和激光脉冲波形,实验条件为 SF₆/C₂H₆ 混合气体总压 P=15 kPa,C₂H₆ 摩尔分数为 6%,储能电容充电电压 U₀=27 kV。从放电波形可以看出,混合气体的放电过程有明显的阶段性特点,在主放电(辉光放电)后间隙仍维持一定的电压,电容器储能最终通过电弧放电而耗尽,从而使得放电可大致分为主放电(A)、电压维持(B)和电弧放电(C)三阶段,三阶段放电过程的形成与 SF₆ 气体放电特性有关^[11]。

当三阶段放电过程同时存在时,第三阶段电弧放电不会影响第一阶段主放电的持续时间和放电稳定性,储能可以通过主放电有效地沉积在气体介质中,此时的主放电是一种稳定的体放电。激光辐射产生在辉光放电阶段,激光脉宽与电流宽度相当,约为 150 ns。研究发现,在改变总气压、充电电压等条件下,主放电电流和激光脉宽均有明显变化,激光器输出能量变化较大,说明激光器输出能量与主放电形式及维持时间密切相关。

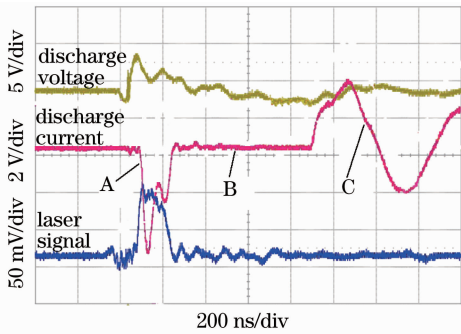


图 3 激光器典型波形

Fig. 3 Typical waveforms of HF laser

3.2 气体介质不循环时激光器重复频率输出特性

实验研究了在混合气体总气压 12 kPa、充电电压 27 kV、 C_2H_6 摩尔分数为 8% 的条件下,气体介质不循环时激光器重复频率输出特性。图 4 为相应的激光输出能量随运行频率的变化规律曲线。从图中可以看出,激光器重复频率运行时如气体介质不

循环,其输出能量(首脉冲除外)下降非常明显且极不稳定,并且随着频率增加,能量快速下降,低频时(约为 10 Hz)输出能量约 100 mJ,高频时几乎无输出。这是因为不循环时,激活区放电产物清除和介质补充主要通过分子热运动,低频时能有一定效果,高频时则明显不足以满足要求,导致放电不稳定(电弧)、放电产物碰撞弛豫以及可用介质不足等,影响输出能量及其稳定性。

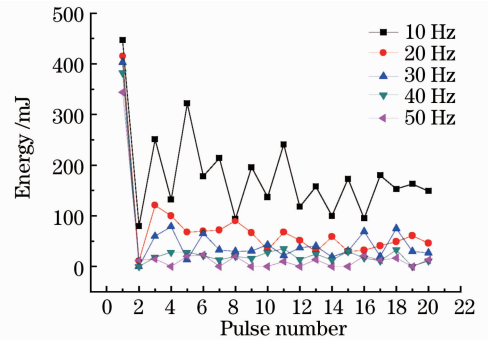


图 4 不同频率时能量稳定性

Fig. 4 Output energy stability versus repetition rate

3.3 气体介质循环速率对激光器重复频率输出的影响

激活区放电产物清除和介质补充可以通过对激活区气体介质的及时置换有效解决,实验中采用轴流风机使气体循环流动来实现这一要求。为确保激光介质实时补给、基态 HF 分子及杂质及时清除,即激光介质的有效置换,循环气体的流速是需要研究

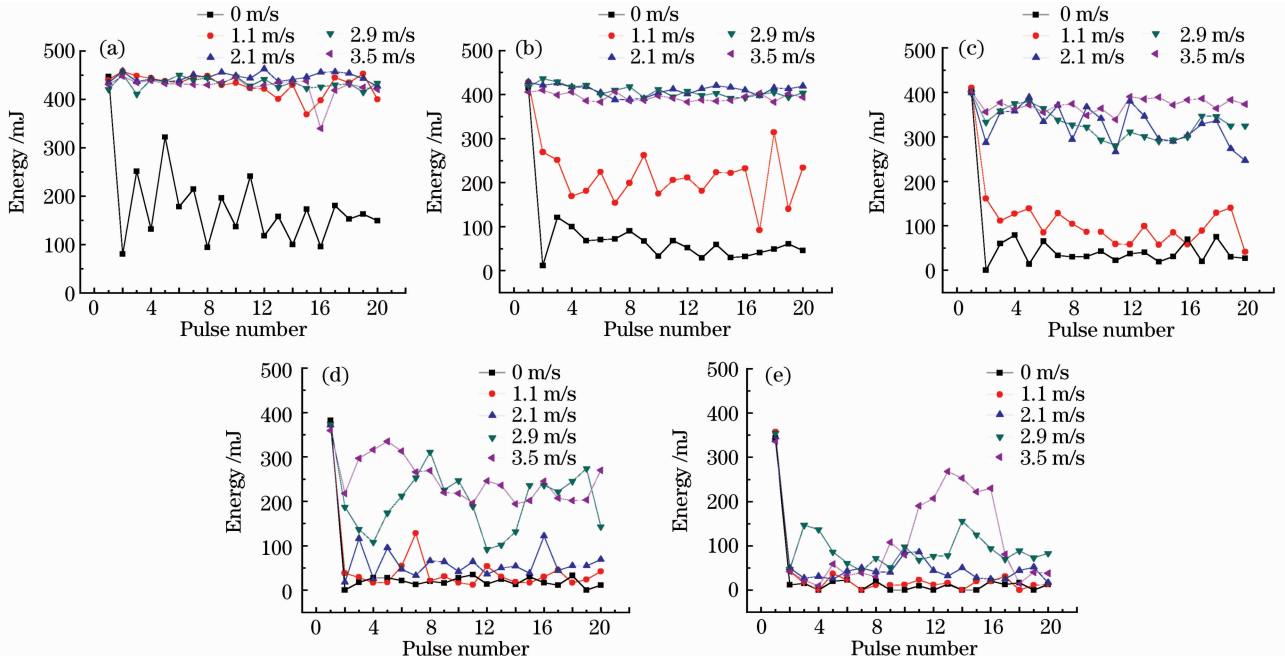


图 5 不同频率时的能量稳定性。(a) 10 Hz; (b) 20 Hz; (c) 30 Hz; (d) 40 Hz; (e) 50 Hz

Fig. 5 Output energy versus repetition rate. (a) 10 Hz; (b) 20 Hz; (c) 30 Hz; (d) 40 Hz; (e) 50 Hz

的重要参数。图 5 为不同循环速率和不同运行频率条件下的输出能量稳定性曲线(连续输出 20 个激光脉冲),其中循环气体流速 0~3.5 m/s。由图 5 可知,气体循环可以显著提高重复频率运行的输出稳定性,输出能量及其稳定性随着气体循环速率的增大而迅速增加和提高,在流速为 3.5 m/s,运行频率 10~30 Hz 的情况下,稳定输出能量大于 350 mJ;但随着运行频率的上升,激光输出能量衰减仍较快且稳定性变差,激光器运行频率在 40 Hz 和 50 Hz 高时,输出能量衰减迅速,且波动很大。激光能量衰减较快的主要原因是风机循环速率不足,导致一方面气体置换不充分,引起放电不稳定;另一方面激光电极间隙(抽运区)介质补充不足和生成物排出不及时也使得激光器输出能量下降。随着频率的上升,这一效应更为明显。

3.4 气体介质放电稳定性对激光器重复频率输出的影响

由激光器输出能量与气体介质放电的关系可知,激光器重复频率运行能量稳定输出的前提条件是实现气体介质的重复频率稳定均匀体放电。由气体放电研究结论可知,充电电压、气体介质种类及其总气压等对气体放电形式有重要影响,实验中主要通过改变以上实验条件来研究放电稳定性对重复频率输出能量稳定性的影响。

在充电电压为 20~27 kV,循环速率 3.5 m/s,

其他实验条件不变的情况下,研究了激光器重复频率运行时气体放电稳定性对重复频率输出能量稳定性的影响。图 6 为运行频率 50 Hz 时,在 20~27 kV 不同充电电压条件连续放电 20 次的典型放电电流及激光脉冲包络波形。图 7 为相应的输出能量稳定性曲线。由图 7 可以看出,在一定气压下,充电电压较低时的重复频率输出能量稳定性较电压较高时要好。激光器运行频率 50 Hz、充电电压 20 kV 时重复频率能量稳定性最好,稳定输出能量约为 130 mJ,能量波动约 5%。对图 6 和图 7 进行对比分析可以得出结论:放电稳定性对重复频率输出能量稳定性有重要影响,重复频率输出能量稳定性随着放电稳定性的改善而迅速提高;在一定气压下,随着充电电压的降低,电弧放电逐步远离主放电,相应的激光脉宽增大,输出能量稳定性好转,在 20 kV 时主放电与电弧放电完全分离,重复频率放电和输出能量稳定性达到最佳水平。在激光器重复频率运行时,由于气体置换不充分造成放电不稳定的主要表现为主放电未结束电弧放电就已形成,致使主放电维持时间缩短,能量沉积效率下降,激光振荡输出时间缩短,输出能量下降,且放电状态的不稳定引起输出能量波动增大。因而,重复频率运行时降低充电电压有利于推迟电弧放电的形成时间,致使电弧放电对体放电的持续时间和稳定性的影响减弱,激光器输出稳定性提高。

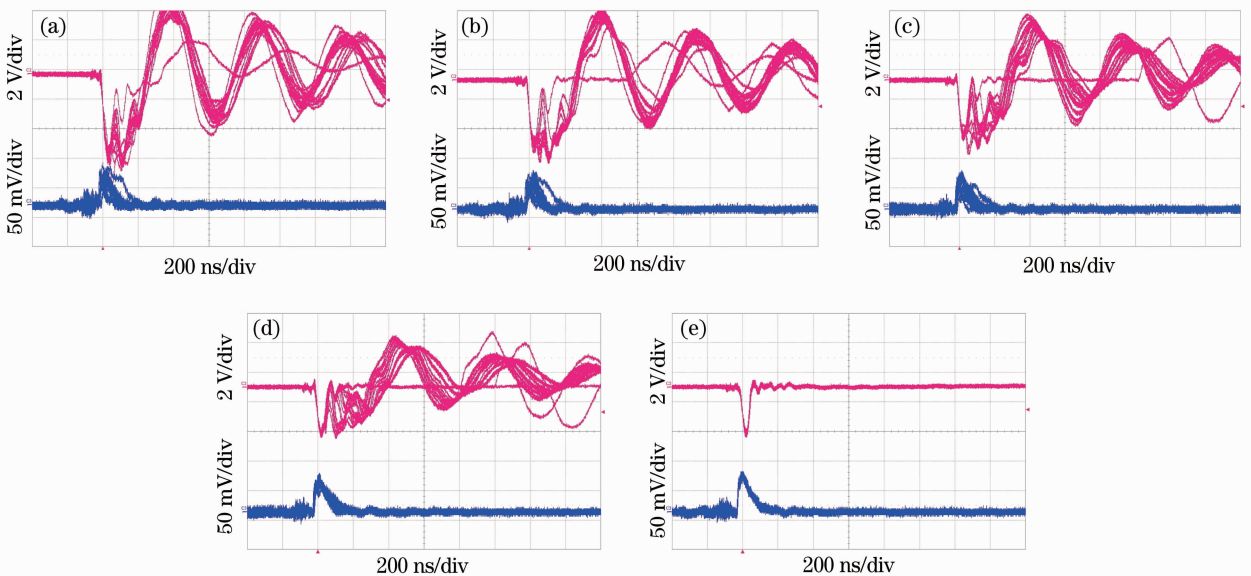


图 6 50 Hz 情况下不同充电电压时的 20 个电流波形、激光脉冲波形叠加图。(a) 27 kV; (b) 25 kV; (c) 23 kV; (d) 21 kV; (e) 20 kV

Fig. 6 Envelop waveforms of current and laser at 50 Hz and different charging voltages. (a) 27 kV; (b) 25 kV; (c) 23 kV; (d) 21 kV; (e) 20 kV

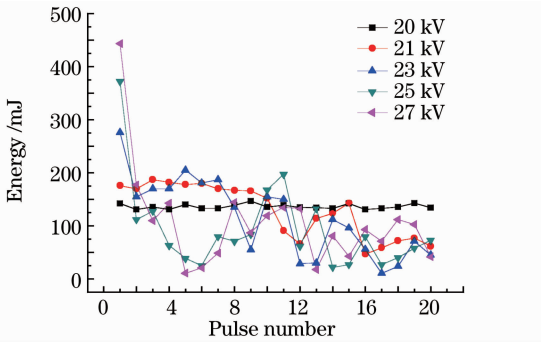


图7 50 Hz 情况下不同充电电压时的能量稳定性曲线

Fig. 7 Output energy stability at different charging voltages

4 结 论

利用实验室已建立的放电激励重复频率 HF 激光装置,开展了激光器重复频率运行能量稳定输出实验研究。实验结果表明,随着频率的上升,激光输出能量衰减较快;增大气体循环速率有利于改善放电稳定性,提高激光器重复频率运行时输出能量稳定性。通过优化实验条件,使得气体介质主放电与电弧放电完全分离,激光器实现了 1~50 Hz 重复频率激光稳定输出,在重复频率 50 Hz 运行时稳定输出能量约 130 mJ,能量波动约 5%。

参 考 文 献

- 1 V. V. Apollonov, K. N. Firsov, S. Y. Kazantsev *et al.*. High-power pulse and pulse-periodic nonchain HF (DF) lasers[C]. *SPIE*, 2002, **4747**: 31~43
- 2 B. Lacour, C. Gagnol, P. Prigent *et al.*. High average power HF/DF laser[C]. *SPIE*, 1998, **3574**: 334~340

- 3 H. Brent, M. Mabru, F. Voignier. High energy high average power pulsed HF/DF chemical laser [C]. *SPIE*, 1995, **2502**: 388~392
- 4 M. R. Harris, A. V. Morris, E. K. Gorton. Closed-cycle 1 kHz pulse repetition frequency HF (DF) laser [C]. *SPIE*, 1998, **3268**: 247~251
- 5 F. G. Goryunov, K. V. Gurkov, M. I. Lomaev *et al.*. Pulsed chemical electric discharge SF₆-H₂ laser[J]. *Quantum Electron.*, 1994, **24**(12): 1064~1066
- 6 V. F. Taraskeo, E. H. Baksht, M. I. Lomaev *et al.*. Efficient non-chain chemical HF lasers initiated by e-beam and self-sustained discharge[C]. *SPIE*, 1998, **3268**: 228~235
- 7 Ke Changjun, Zhang Kuohai, Sun Ke *et al.*. A periodically pulsed HF/DF gas discharge laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(suppl.): 36~38
- 柯长军, 张阔海, 孙科等. 重复频率放电引发的脉冲 HF(DF) 激光器[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(增刊): 36~38
- 8 Ke Changjun, Wan Chongyi. Status and prospect of electric-discharge non-chain pulsed HF laser [J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(4): 304~305
- 柯常军, 万重怡. 放电引发非链式脉冲 HF/DF 激光器的研究进展[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(4): 304~305
- 9 Huang Ke, Yi Aiping, Yu Li *et al.*. Discharge characteristics of SF₆/C₂H₆ working mixture in electric-initiated pulsed HF laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(10): 2353~2357
- 黄珂, 易爱平, 于力等. 电激励脉冲 HF 激光 SF₆/C₂H₆ 工作气体的放电特性[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(10): 2353~2357
- 10 Tang Ying, Yi Aiping, Zhu Feng *et al.*. Study on characteristics of spark gap switch for HF laser [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(8): 834~838
- 唐影, 易爱平, 朱峰等. 用于 HF 激光器的气体火花开关特性研究[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(8): 834~838
- 11 Zhu Feng. Experimental Investigation on Influence Factors of Gas Discharge and Output Energy of Non-Chain HF Laser [D]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2008. 19~24
- 朱峰. 非链式 HF 激光器气体放电和输出能量影响因素实验研究[D]. 西安: 西北核技术研究所, 2008. 19~24

栏目编辑: 宋梅梅