

文章编号: 1001-3806(2006)05-0458-04

## 被动式探针光系统工程化改造研究

黄 进, 袁晓东, 秦兴武, 王成程, 邓 武, 徐 冰, 蒋东滨  
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

**摘要:** 星光 II 激光装置上建立的紫外探针光系统, 用星光 II 的子束作为抽运光源, 通过倍频和受激喇曼散射, 将波长为 1054nm、脉宽约为 800ps 的激光转换成波长为 308nm、脉宽约为 60ps、能量为 1mJ 左右的紫外光, 作为激光等离子体诊断的光源。原有探针光系统由于受系统结构不稳定及光束质量较差等因素的影响, 不能稳定运行。为了提高系统的运行质量和稳定性, 对原系统进行了工程化的改造。通过实验验证, 探针光系统输出能量能够达到 1mJ 左右、脉宽约为 30ps 均匀性较好、运行成功率大于 90%, 这一结论满足了激光等离子体诊断光源的要求。

**关键词:** 激光技术; 等离子体诊断; 探针光源; 受激喇曼散射; 四倍频激光

中图分类号: TN206 文献标识码: A

## Engineering alteration of a passive mode optical probe system

HUANG Jin, YUAN Xiao-dong, QIN Xing-wu, WANG Cheng-cheng, DENG Wu, XU Bing, JIANG Dong-bing  
(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** The UV optical probe at xingguang II laser installations is pumped by a sub-laser beam. A pulse of 800ps with 1054nm wavelength is converted into an output UV pulse with 1mJ energy, 60ps pulse width and 308nm wavelength through stimulated Raman frequency conversion. The obtained UV laser pulse can be used as the lamp house for laser plasma diagnosis. The original optical probe can't run steady because of poor quality and structure instability. In order to enhance the quality and stability, engineering alteration is performed on the original system. Experiment results prove that the optical probe can output a uniform pulse with 1mJ energy, 30ps pulse width, and it can operate steadily with stabilization rate over 90%, which meets the requirement of the probe lamp house for laser plasma diagnosis.

**Key words** laser technique; plasma diagnosis; probe lamp house; stimulated Raman scatter; frequency multiplication

### 引 言

超短脉冲激光具有很高的时间分辨率, 可在短时间内捕获等离子体像, 给出重要的物理信息, 是等离子体靶区物理诊断不可缺少的工具。目前世界上已建成的大型固体激光装置<sup>[1]</sup>都在极力发展探针光诊断技术。为了与高功率激光装置打靶光同步、实现有效的脉冲压缩, 同时避免等离子体中谐波分量的干扰<sup>[2~4]</sup>, 星光 II 激光装置上的探针光采用从主束上分出的一路子束作为诊断系统的抽运光源, 将其倍频后再采用受激喇曼散射的方法进行频移和脉宽压缩来获得紫外超短脉冲的激光探测光束<sup>[5]</sup>。原有的探针光系统由于受抽运光源光束质量及系统结构不稳定等因素的影响, 一直未能稳定的运行, 根据星光 II 装置对探针光打靶的要求, 必须对其进行工程化的改造, 其要达到的技

术指标为: 输出波长为 308nm; 输出能量大于 1mJ(越大越好); 脉冲宽度小于 60ps(越窄越好); 时间同步精度为  $\pm 50\text{ps}$  运行成功率大于 80%。

### 1 探针光系统的基本原理及存在的问题

该系统首先采用两块 BBO 晶体对基频光进行四倍频, 将波长为 1054nm 的激光转换为 263nm<sup>[6]</sup>; 然后采用两级喇曼气体介质将波长频移和脉宽压缩, 第 1 级 CO<sub>2</sub> 将波长频移至 273nm, 并将脉宽压缩至 200ps, 第 2 级 H<sub>2</sub> 将波长频移至 308nm, 并将脉宽压缩至 60ps 以下。其原理如图 1 所示。

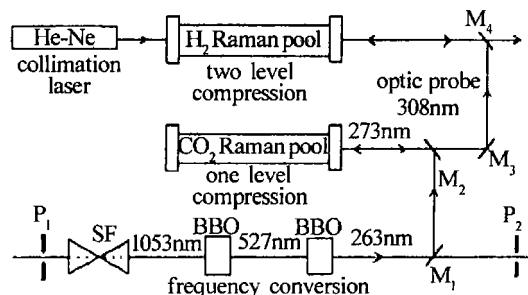


Fig 1 The principle of the frequency conversion and pulse width compression of the passive optical probe

基金项目: 国家八六三计划资助项目 (8301)

作者简介: 黄 进 (1980), 男, 研究实习员, 主要从事高功率固体激光技术研究。

E-mail: huangj88@tom.com

收稿日期: 2005-08-15; 收到修改稿日期: 2005-10-11

该系统从 1996 年正式开始实验, 历经 3 次技术改进, 一直没能稳定运行。目前存在的主要问题见下。

(1) 紫外探针光系统输出光束参数的稳定性太差。由于探针光系统的受激喇曼散射本身是一个非线性的过程, 导致脉宽压缩的可重复性较差, 其输出的光束质量也很不理想。前期数据表明, 该系统从建立至今, 运行成功率不足 10%。

影响运行成功率的另一重要因素是由于抽运光的光束质量较差且不稳定, 导致紫外探针光的能量、脉宽和光束质量都不能达到实验要求。在 2002 年实验中, 针对抽运光的光束质量问题, 增加了空间滤波器, 进行部分像传递处理, 力求改善入射基频光的光束质量<sup>[7]</sup>, 尽管情况有所好转, 但由于子束光束质量固有的问题, 仍然会出现四倍频光束质量太差的现象, 从而对后面的脉宽压缩造成影响。因此, 要提高紫外探针光的运行成功率, 必须进一步解决光束质量的问题。

另外, 尽管 BBO 晶体本身的机械性能较好, 但系统结构的不稳定仍然会直接影响到倍频和压缩的质量, 从而导致输出光束质量的不稳定<sup>[8]</sup>。图 2 为改造前的紫外探针光输出的近场分布和时间波形。

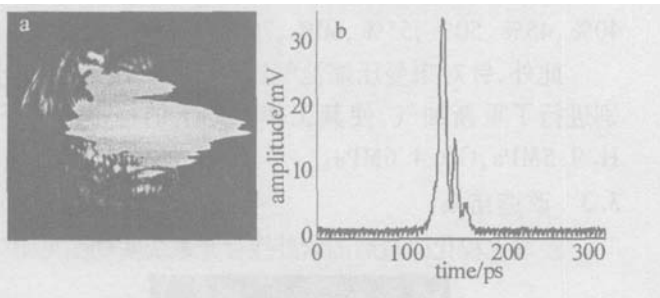


Fig 2 The pulsewidth and facula before alteration

(2) 探针光系统输出能量与脉宽压缩的矛盾。由于受激喇曼散射 (stimulated Raman scatter SRS) 是三阶非线性效应, 当抽运光接近 SRS 产生的阈值时, 输出激光的脉宽可压缩到极小, 但此时整个系统输出的能量最多只能达到 1mJ 左右, 如果进一步提高抽运能量, 在压缩池会出现高阶斯托克斯的竞争、其它非线性效应的干扰以及多次产生 SRS 等现象, 导致脉冲变宽, 光束质量下降和产生多脉冲等<sup>[9]</sup>。因此, 要想进一步提高输出的探针光能量, 必须要解决输出能量与脉宽压缩之间的矛盾。从前面几年的实验情况来看, 一直未能找出探针光系统的最佳抽运条件, 只有确切地找出抽运光与输出光参数之间的联系, 确定最佳的抽运条件, 才能使探针光系统工作在最佳状态。因此, 在进行工程化改造之前, 有必要独立于星光子束进行一轮确定紫外探针光抽运光参数的预研实验。

## 2 预研实验

### 2.1 实验目的

寻找最佳抽运光注入条件, 提出对星光 II 子束的要求; 判断该系统稳定运行的条件, 找出解决系统不稳定的措施。

### 2.2 实验研究

根据研究的目的, 采用如图 3 所示的光路对紫外探针光系统的输入、输出参数进行研究。

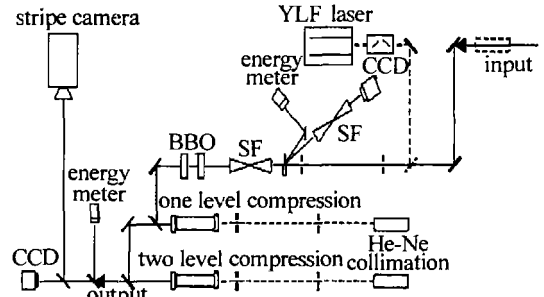


Fig 3 The experiment sketch map

为获得均匀性较好的抽运光, 此次实验用星光 II  $\varnothing 40\text{mm}$  放大器级输出光来作为抽运源, 并且将整个装置安放在一个独立的工作平台上, 避免外界环境对系统结构的稳定性造成影响。实验证明, 在解决了抽运光光束质量和机械结构稳定性的前提条件下, 探针光的输出光束质量得到了较大的改善。图 4 为改造后的探针光系统抽运光和对输出探针光的近场分布。

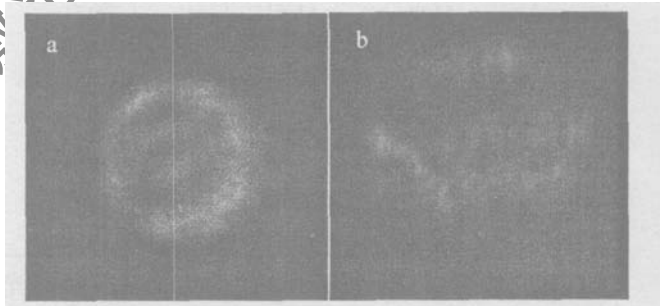


Fig 4 The facula of inject laser and output 308nm UV laser

### 2.3 预研结论

经过一段时间的研究, 该系统在抽运光能量为 30mJ 脉宽约 800ps 时, 可稳定输出 308nm 紫外光的能量为 0.3mJ~0.4mJ 脉宽为 19ps~30ps, 其时间波形如图 5 所示。

从表 1 可看出, 当抽运光能量在 50mJ 左右时, 探针光输出的能量接近 1mJ 但均匀性较差, 且脉宽未能有效压缩 (大约 150ps), 从这里就体现出了抽运光输出能量与脉宽压缩之间的矛盾, 只有减少抽运光的能量到 30mJ 左右时, 才能使输出的 308nm 紫外光脉宽、均匀性同时达标, 但此时输出能量偏小 (大约 0.4mJ)。

根据此次预研实验确定的最佳工作条件如下: 温度为 20°C; 湿度为 30~40% 抽运光能量为 30mJ 左右, 均匀性较好。另外也发现, 由于探针光系统的长期使用, 两级喇曼压缩池的气压已经低于标准值, 决定在工程化改造之前重新充装压缩气体, 使其在标准状态下工作。

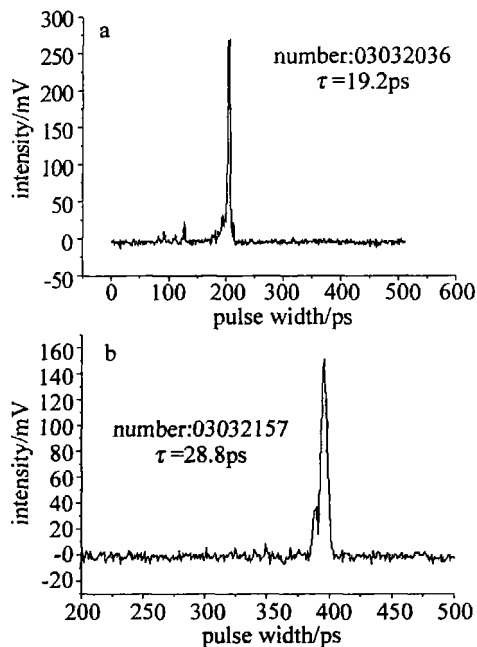


Fig 5 The time region waveform of the output 308nm laser pulse

Table 1 The input energy and output energy

| serial number | time  | input energy /mJ | output energy /mJ |
|---------------|-------|------------------|-------------------|
| 20030220262   | 9:30  | 43.74            | 0.83275           |
| 20030220264   | 10:10 | 49.94            | 0.95172           |
| 20030220266   | 12:30 | 55.99            | 0.7399            |
| 20030220268   | 13:05 | 47.64            | 0.75151           |
| 20030220270   | 13:45 | 50.93            | 0.57886           |
| 20030220272   | 14:35 | 46.74            | 0.88208           |
| 20030319464   | 15:55 | 32.01            | 0.43234           |
| 20030319465   | 16:10 | 28.96            | 0.36125           |
| 20030319467   | 16:35 | 30.62            | 0.35544           |
| 20030319469   | 17:00 | 30.39            | 0.33513           |

由此可以看出,工程化改造的重点是解决抽运光子束的均匀性和稳定性,该系统的机械结构在稳定性方面也必须重新设计。

### 3 工程化改造

鉴于原探针光系统的问题,该工程化改造实施方案将重点从两个方面入手:改善抽运光子束的光束质量、采用一体式的布局加强装置的机械结构稳定性。

#### 3.1 抽运光光束质量的改善

针对紫外探针光系统对抽运光光束质量较高的要

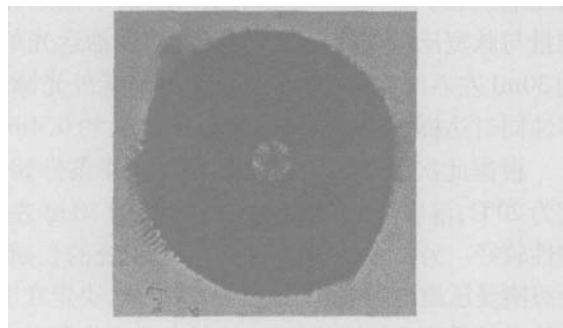


Fig 6 The sampling facula of the pump laser

求,对星光II激光装置的子束光路进行了一次彻底的调整,如架设了软边光阑,同时对放大器的水冷腔进行了清洁,改善氙灯抽运的均匀性等,结果证明,子束输出的光束质量有了明显的改善<sup>[10]</sup>。图6为在探针光系统的输入端取样镜后的近场图,其中中间白色的区域即为被取样镜反射到探针光系统作为抽运光的部分。

#### 3.2 紫外探针光系统机械结构的改造

结构稳定性是决定紫外探针光系统稳定性的关键因素之一。因此,工程化改造的另一任务是对现有系统进行一体化设计和改造,消除镜架、基座等不稳定性的影响。整个探针光系统除取样镜外,全部集中在大约1100mm×400mm×150mm的箱体内部,箱体内部所有的镜架也全部采用了全新加固的设计。

由于取样镜透过的子束将作为汤姆逊散射系统所需光源,按照汤姆逊系统对大能量的要求,子束激光装置的输出能量一般控制在至少30J。根据2005年预研实验的结果,要使用小孔后的抽运能量保持在30mJ左右,则子束能量应控制在10J~15J。因此,需对紫外探针光系统的抽运子束进行衰减,在实际工作中采用了8块衰减系数不同的片子,衰减系数分别为30%、40%、45%、50%、55%、60%、70%和80%。

此外,针对喇曼压缩池气压降低这一问题,对其分别进行了重新加气,使其工作在如下的标准状态下:  
 $H_2$  9 MPa  $CO_2$  4 MPa

#### 3.3 改造结果

经过工程化改造后的紫外探针光系统实物图见图7

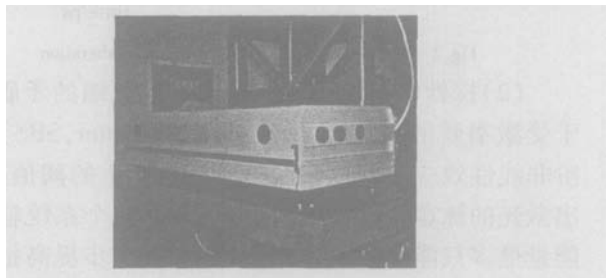


Fig 7 The photo of the actual optical probe

为验证工程化改造后的紫外探针光系统的稳定性,特进行了一轮实验,实验数据见表2。

Table 2 The energy and pulsewidth

| number      | time  | energy of sub laser/J | energy of 308m laser/mJ | pulse width/ps | remark   |
|-------------|-------|-----------------------|-------------------------|----------------|----------|
| 20031202001 | 11:05 | 28.4                  | 2.087                   | 27.12          |          |
| 20031202002 | 11:25 | 31.8                  | 1.864                   | 20.76          |          |
| 20031202003 | 12:35 | 29.8                  | 1.045                   | /              | outphase |
| 20031202004 | 13:00 | 30.2                  | 1.341                   | /              | outphase |
| 20031202005 | 13:15 | 28.2                  | 1.701                   | 16.95          |          |
| 20031202006 | 13:35 | 26.6                  | 1.205                   | 20.47          |          |
| 20031202007 | 14:10 | 30.0                  | 1.522                   | 16.69          |          |
| 20031202008 | 14:25 | 29.0                  | 1.110                   | 20.67          |          |

图 8 为改造后输出的 308nm 紫外探针光的时间波形。由于条件限制,此次实验没有进行 308nm 光束

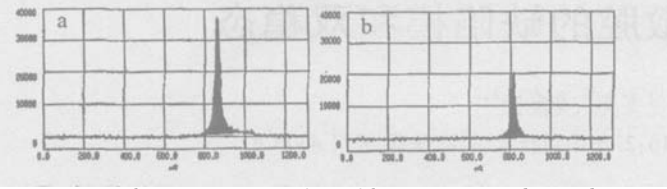


Fig 8 The time-region waveform of the output 308nm laser pulse

的均匀性测量。实验研究结果表明:在解决了抽运光束质量的情况下,系统的倍频效率和压缩质量有了很大的提高,输出的 308nm 紫外光的能量大于 1mJ,且脉宽也得到了有效的压缩。经过系统机械结构稳定性改造后的紫外探针光系统能够长时间稳定运行,成功率大于 90%,达到了研制标的,可以作为等离子体激光诊断的探针光源。

#### 4 讨论

如要进一步提高探针光系统的输出能量,单纯地提高抽运光能量导致的后果只能是使输出的脉宽得不到有效的压缩。要想提高注入喇曼池的倍频光能量且又不至于超过 SRS 产生的阈值,可采用在高能量倍频光进入喇曼池前用 4 块拼接的劈板将其分为水平的 4 束激光,进入喇曼池后分别聚焦压缩,通过这样的方法就能达到既能输入高能量的激光进入喇曼池,又能不影响脉宽有效压缩的目的,从而解决了高能量探针光输出与脉宽压缩之间的矛盾。

如要进一步提高探针光输出的稳定性,也可以在抽运光进入空间滤波器前加上高斯反射镜将其整形为高斯型光源注入,并在倍频器上加上恒温装置<sup>[11]</sup>,这

样将会极大的稳定倍频晶体的倍频效率,从而产生稳定的 308nm 紫外探针光的输出。

#### 参 考 文 献

- [1] WANG Ch Ch, YU H W, ZHOU H *et al* A new high power solid-state laser multi segment amplifier [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(1): 1~3 (in Chinese).
  - [2] LI Y F, MA J X. High-order harmonic generation by relativistic lasers in a Maxwellian distributed plasma [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2002, 16(5): 801~805 (in Chinese).
  - [3] ZHANG J, ZEPT M, NORREYS P A *et al*. Coherence and bandwidth measurements of harmonic generated from solid surface irradiated by intense picosecond laser pulses [J]. *Phys Rev*, 1996, A64: 1597~1603.
  - [4] NORREYS P A, ZEPT M, MOUSTAIZIS S *et al*. Efficient extreme UV harmonics generated from picosecond laser pulse interaction with solid targets [J]. *Phys Rev Lett* 1996, 76(4): 1832~1835.
  - [5] CHEN Y B, YUAN X D, GUO L F *et al* Development for a laser device with 40J energy [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2000, 12(s1): 158~161 (in Chinese).
  - [6] GLENZER S H, WELAND T L, BOWER J *et al* High energy 4W probe laser for laser plasma experiments at Nova [J]. *Rev Scient Instrum*, 1999, 48(11): 1241~1244.
  - [7] GUO Y K, BAO P D. Course of optics [M]. Chengdu Siduan University Press, 1993. 256~259 (in Chinese).
  - [8] XU R P, LIU J H. Course of laser apparatus and technic [M]. Beijing: Beijing Industry College Press, 1986. 435~437 (in Chinese).
  - [9] KIRKWOOD P K, MacGOWAN B J, MONTGOMERY D S *et al*. Effect of ion wave damping on stimulated Raman scattering in high-Z reduced plasma [J]. *Phys Rev Lett* 1996, 77(5): 2706~2708.
  - [10] WANG Ch Ch, YUAN X D, CHEN Q H *et al* Design optimization of sub-beam laser system used for ICF benchmark experiments [J]. *Optics & Optoelectronics Technology* 2003, 1(5): 35~38 (in Chinese).
  - [11] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 519~520 (in Chinese).
- (上接第 457 页)
- [3] PETERE II J, ABELS P, KAERLE S *et al* Failure recognition and on-line process control in laser beam welding [A]. Proc of ICAL EO' 2002 [C]. Orlando: Laser Institute of America, 2002. 2501~2509.
  - [4] MIYAMOTO I, MORIKI D. Development of in 2 process monitoring system for laser welding [A]. Proc of ICAL EO' 95 [C]. Orlando: Laser Institute of America, 1996. 759~767.
  - [5] GU H P, DULEY W W. Discrete signal components in optical emission during keyhole welding [A]. Proc of ICAL EO' 97 [C]. Orlando: Laser Institute of America, 1998. 40~46.
  - [6] GUO J, LIU Ch, YANG W G *et al*. Detection of the axial optical signal during keyhole laser welding [J]. *Laser Journal* 2003, 24(1): 51~53 (in Chinese).
  - [7] LIU Ch. Study about the coaxial monitoring and penetration control in CO<sub>2</sub> laser welding [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. 1~97 (in Chinese).
  - [8] ZHANG X D, CHEN W Zh. Coaxial monitoring and penetration control in CO<sub>2</sub> laser welding [J]. *Transactions of the Chinese Welding Institution* 2004, 25(4): 1~4 (in Chinese).
  - [9] QIN G L, QIX B, YANG Y G *et al*. Collection of coaxial emission in high power Nd:YAG laser deep-penetration welding [J]. *Applied Laser* 2003, 23(4): 205~208 (in Chinese).
  - [10] CHEN W Zh, JIA L, ZHANG X D *et al*. Coaxial vision sensing system and detection of penetration status in CO<sub>2</sub> laser welding [J]. *Applied Laser* 2004, 24(3): 130~134 (in Chinese).
  - [11] WANG J Ch. Development and expectation of laser welding technology [J]. *Laser Technology*, 2001, 25(1): 48~53 (in Chinese).