

·封面文章·

脉冲染料激光的线宽压缩与测量

张乔枫¹, 谢锦林^{1*}, 范费彬², 桑龙龙², 丁卫星², 陆全明²

¹中国科学技术大学工程与应用物理系, 安徽 合肥 230026;

²中国科学技术大学地球和空间科学学院近地空间环境重点实验室, 安徽 合肥 230026

摘要 设计并自制了一种平行平面腔法布里-珀罗干涉仪, 将脉冲染料激光器的输出线宽由 4 GHz 压缩至 340 MHz。采用法布里-珀罗标准具拍照法对激光线型进行实时监测, 实现了脉冲激光线型的同步扫描; 配合碘吸收谱测量, 搭建了经线宽压缩的脉冲染料激光的 100 MHz 量级的精细波长调谐及标定系统。将该激光系统用于氧化物阴极放电氩等离子体的激光诱导荧光诊断中, 验证了线宽压缩系统的可行性, 离子速度分布函数的速度分辨率可达 200 m/s。

关键词 测量; 脉冲染料激光器; 法布里-珀罗干涉仪; 压缩线宽; 波长调谐

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0404002

Linewidth Narrowing and Measurement of Pulsed Dye Laser

Zhang Qiaofeng¹, Xie Jinlin^{1*}, Fan Feibin², Sang Longlong², Ding Weixing², Lu Quanming²

¹Department of Engineering and Applied Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²CAS Key Laboratory of Geoscience Environment, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract A parallel-plane cavity Fabry-Perot interferometer is designed and made to narrow the linewidth of the pulsed dye laser from 4 GHz to 340 MHz. The Fabry-Perot etalon photographing method is used to monitor the laser line type in real time, and the synchronous scanning of the pulse laser line type is realized. With the iodine absorption spectrum measurement, we built a fine-wavelength tuning and calibration system on the 100 MHz scale of the linewidth narrow pulsed dye laser. The laser system is used in the laser-induced fluorescence diagnostic of oxide-coated cathode discharge argon plasma. The feasibility of the linewidth narrowing system is verified, and the velocity resolution of the ion velocity distribution function is up to 200 m/s.

Key words measurement; pulsed dye laser; Fabry-Perot interferometer; narrowing linewidth; wavelength tuning

OCIS codes 120.2230; 140.2050; 140.3570; 140.3600; 140.4780

1 引言

随着激光器技术的发展,染料激光器因其宽阔的调谐范围在各类科学研究中被广泛使用,具有调谐范围广、功率高及脉冲重复频率高特性的脉冲染料激光器是其他激光器较难超越的。但是,脉冲染料激光光线宽相对较宽,线宽更窄的半导体激光器等各类可调谐激光器的发展^[1]对染料激光器的应用造成了较大冲击。例如,由反射镜(M)和光栅(G)构

成的 MGM^[2-3]腔和 MGG^[4-5]腔等易于调节的经典单模染料激光器可将激光光线宽压缩至吉赫兹量级,在原子或分子物理、生物及化学方面,通常将激光光谱作为“标记”手段,而在精细光谱的测量方面,染料激光器常常被激光光线宽更窄的固体可调谐激光器所取代。

在等离子体物理中,激光诱导荧光(LIF)诊断^[6]作为非侵入式、高选择性及高灵敏性的主动光谱诊断在等离子体离子速度分布函数和密度等关键

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2018-12-18; 录用日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(41527804, 41331067)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC010)

* E-mail: jlxie@ustc.edu.cn

参量的测量中有广泛应用。根据多普勒效应,在激光传播方向上的诱导激发过程存在速度选择,只有当离子速度 v_{ion} 和激光频率 ω_{laser} 满足 $\omega_{laser} - \kappa_{laser} \cdot v_{ion} = \omega_0$ 时,离子才会被抽运激发,其中 ω_0 为吸收峰中心频率。利用线宽低于多普勒展宽一个量级的激光进行选择性地抽运激发,通过激光频率的扫描实现离子速度空间的扫描,再根据荧光强度随频率的变化曲线,即可得到离子速度分布函数。对于低温等离子体而言,离子温度接近室温,其离子光谱的多普勒展宽在吉赫兹量级,线宽在 100 MHz 量级的激光方可实现精细的离子速度扫描。吉赫兹量级的脉冲染料激光在激光带宽大于多普勒展宽的情况下,可将整个速度空间的所有粒子无速度选择地抽运到高能态,因此荧光强度大小可表征等离子体密度^[7],而对于离子速度分布函数的精细测量,常采用激光线宽更窄的连续波染料激光器^[8]和半导体激光器^[9],几乎不采用脉冲染料激光器,这无疑会大幅提高激光诊断系统搭建的成本,造成极大的浪费。

本文设计并搭建了一种脉冲染料激光器的平面平行腔外腔线宽压缩系统,在保留染料激光器调谐范围广、功率高及重复频率高的前提下,进一步优化激光线宽,并将其应用到 LIF 诊断对等离子体离子速度分布函数的诊断中,大大简化了等离子体激光

诊断系统,让一激光系统同时诊断等离子体离子密度和离子速度分布成为可能。

2 实验装置搭建

图 1 是实验装置示意图。左边为 Nd:YAG 脉冲激光器,产生 1064 nm 激光,将其经二倍频晶体后输出的激光能量为 700 mJ、脉宽为 10 ns,及重复频率为 30 Hz 的 532 nm 激光作为染料激光器抽运激光。染料激光器采用 MGG 腔,选用在 615 nm 附近有 26% 峰值转化效率的若丹明 B 加若丹明 640 混合染料溶液作为激光增益介质,染料激光器输出能量为 180 mJ,理论线宽为 1.7 pm(约 1.3 GHz)。中间为外腔压缩线宽系统,由法布里-珀罗(F-P)标准具、平面平行腔压缩线宽及碘吸收池标定波长三部分构成,系统中利用 F-P 标准具测量线宽。右边为 LIF 诊断系统,选择的氩离子为常用的三能级结构氩离子^[10],611.49 nm 激光将 $3d^2G_{9/2}$ 能级亚稳态离子抽运到 $4p^2F_{7/2}$ 激发态,弛豫退激发到 $4s^2D_{5/2}$ 基态,发射出 460.92 nm 荧光。而以离子温度 0.25 eV 计算得到的 Ar 亚稳态离子多普勒展宽为 3 GHz,原始的激光线宽与之相当,难以直接用于选择性抽运激发,进行精细的离子速度分布测量,因此需要将激光线宽压缩至 300 MHz 量级。

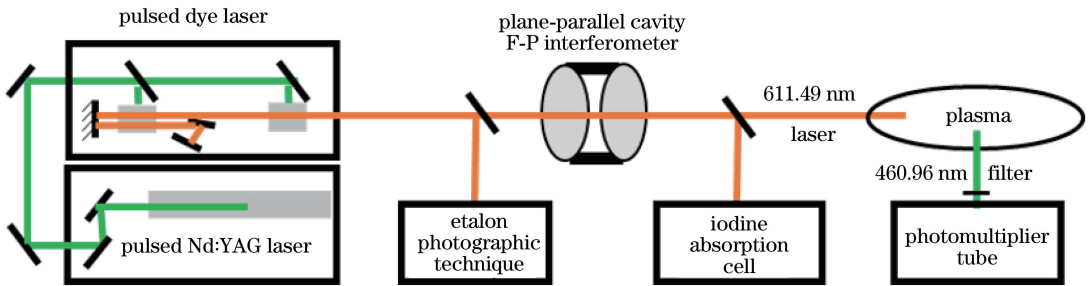


图 1 脉冲染料激光器的外腔压缩线宽系统及 LIF 诊断系统示意图

Fig. 1 Schematic of external cavity narrowing linewidth system and LIF diagnostic system composed of pulsed dye laser

2.1 激光线宽测量

在激光线宽压缩实验中,染料激光器的激励频段相对较宽,MGG 腔光栅大掠角接近 90° ,波长对角度敏感,导致染料激光器输出容易出现多个腔模,所以首先要完成激光器原始线宽的测量和调节。F-P 干涉仪作为经典的选频元件,有两种常用的线宽测量方法:F-P 标准具拍照法^[11]和 F-P 干涉仪扫描法。

对于脉冲激光而言,在早期的实验中 F-P 标准具拍照法采用胶片多次曝光成像,用于得到干涉条纹,可粗略测量激光线宽范围,无定量强度分辨;而 F-P 干涉仪需逐点慢扫描,虽耗时较长,但可精确地

描绘激光线型,得到准确的激光线宽,是激光线宽测量的主流方式。随着工业技术的进步,可采用电荷耦合图像传感器(CCD)替代相机胶片,通过利用 CCD 探测灰度表示光强来定量描绘激光线宽,从而将传统的 F-P 标准具拍照法发展成一种实用激光线宽光谱成像测量技术^[12]。

在实验中,利用 F-P 标准具拍照法可实现对染料激光器腔模的实时监控调节。如图 2 所示,脉冲染料激光经扩束后,通过毛玻璃发散,成为扩展光源,再经过自由光谱区为 10 GHz 的 F-P 标准具,最后利用平凸透镜将其聚焦成像在 CCD 上。如图 3

所示, CCD 所拍的 F-P 干涉条纹的每两条亮纹间隔由自由光谱区宽度决定, 对应为 10 GHz。由读出的 CCD 两级亮纹间像素点数目对应于自由光谱区宽度 10 GHz, 可得像素点与频率的对应关系, 再根据亮纹宽度可拟合出激光输出线型。由图 3(a) 可知, 谐振腔主轴光线与光栅选频光线匹配不佳时, 激光

器将出现多模输出的情况。通过对输出耦合镜的角度进行调节, 可将激光器调节至单模输出状态, 如图 3(b) 所示。将 F-P 标准具拍照法作为激光线宽的光谱成像测量手段, 虽然灰度不是光强的线性函数, 不能直接对激光线宽进行定量测量, 但可作为常规的模式监测手段, 用以提升激光器调节的效率。

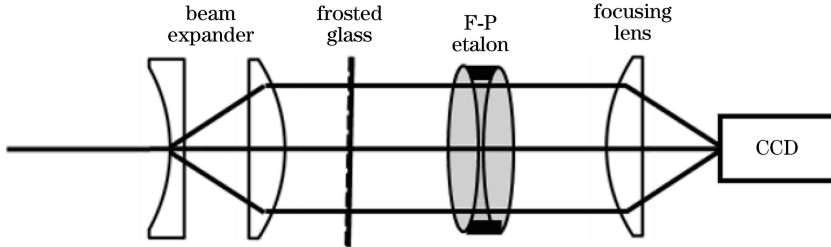


图 2 F-P 标准具拍照法的实验示意图

Fig. 2 Experiment schematic of F-P etalon photographing method

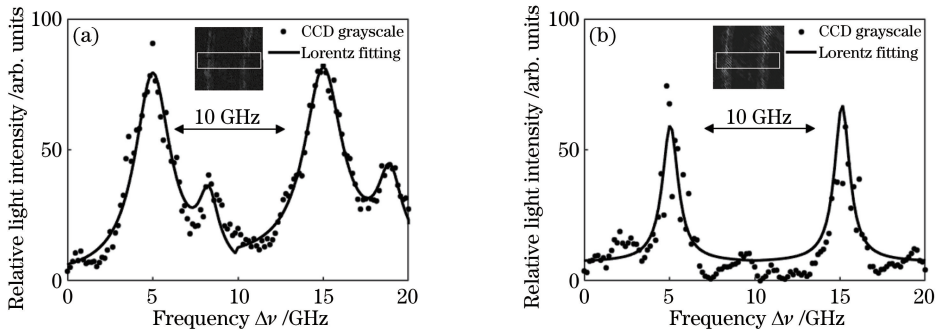


图 3 利用 F-P 标准具后的激光输出线型。(a) 多模输出(激光器失调); (b) 单模输出

Fig. 3 Laser output line types after using F-P etalon. (a) Multimode output (laser detuning); (b) single-mode output

仍采用经典的 F-P 干涉仪逐点慢扫描法进行激光线宽的精细测量。在利用 F-P 标准具拍照法将激光调节至单模输出后, 如图 3(b) 所示, 根据干涉亮条纹的半峰全宽可估计出激光线宽在吉赫兹量级, 故选用自由光谱区为 10 GHz 的商用共聚焦 F-P 干涉仪进行测量。共聚焦 F-P 干涉仪的镜面反射率高, 精细度为 150, 仪器线宽 $\omega_{1/2} = 67$ MHz, 测量结果如图 4 所示, 染料激光器输出激光的线宽为

4 GHz, 仪器线宽的影响可忽略。

2.2 外腔压缩激光线宽

为满足 LIF 诊断的激光线宽需求, 采用外腔线宽压缩方法(窄带滤波法), 可在不影响激光器原有性能的前提下, 二次选择输出线宽。光栅等色散元件依赖角度选频, 不可直接加入激光光路, 且能量损耗极高, 光栅表面易受热变形导致外腔不稳定。

已有很多关于利用 F-P 干涉仪对连续波可调谐染料激光器进行外腔线宽压缩及稳频的报道^[13-14], 商用 F-P 干涉仪多采用共轴球面腔, 其衍射损耗小, 为稳定腔, 易于安装调试, 但模体积小, 并不适用于高功率脉冲染料激光的外腔压缩线宽设计。以前文提及的商用 F-P 干涉仪为例, 共聚焦聚焦束腰直径为 150 μm , 反射镜损伤阈值为 0.25 J/cm², 入射能量限制在 0.044 mJ 内, 这极大地限制了入射激光的激光功率。因此, 选用平行平面腔制成的 F-P 干涉仪作为脉冲染料激光器外腔压缩线宽的工具, 其模体积大, 输出能量高, 可适用于

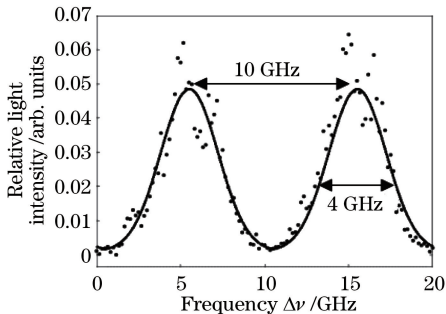


图 4 F-P 干涉仪测得的染料激光线宽

Fig. 4 Linewidth of dye laser measured by F-P interferometer

大功率激光的线宽压缩,但其为非稳腔,工业成品较少,本研究自行设计搭建了一套平面平行腔 F-P 干涉仪。

如图 5(a) 所示,平行平面腔由直径 50 mm 和直径 25 mm 两面互相平行的可见光波段宽带介质膜平面反射镜构成,直径 25 mm 的反射镜由环形压电陶瓷(PZT)平行致动,构成 F-P 干涉仪。脉冲激光展宽为 4 GHz,线宽压缩的目标参数为 300 MHz,为确保单模输出,设计 F-P 干涉仪不同级次谱间不发生重叠的光谱范围,即自由光谱区为 $R_{fs} = c/(2nL) = 10$ GHz,其中 c 为光速, n 为空气折射率, L 为腔长。为在保证线宽压缩的同时,保持较高的激光能量,F-P 腔选择由两面反射率 $R = 95\%$ 、损伤阈值为 1 J/cm^2 的反射镜组成。10 ns 脉冲激光光线长度有限,在该 F-P 干涉仪中发生有限级次干

涉,与连续光无限次干涉计算得到的精细度理论值相比,其等效精细度仅为理论值的一半^[11],该自制 F-P 腔对于所用脉冲激光的等效精细度为 30,输出线宽 $\omega_{1/2} = R_{fs}/F = 333 \text{ MHz}$, F 为精细度。PZT 的通光孔径为 19 mm,考虑能量均匀入射,最大输入能量可达 2.8 J,远超过染料激光器输出能量。

同样使用 10 GHz 共焦腔 F-P 干涉仪对经自制平行平面腔 F-P 干涉仪压缩线宽后的激光进行测量,先用 PZT 将自制平行平面腔 F-P 干涉仪的腔长锁定在有较大能量输出的位置,测量得到平行平面腔 F-P 干涉仪压缩后的激光线宽为 340 MHz,如图 5(b) 所示。自制平面平行腔 F-P 干涉仪测试结果与理论设计一致,实现了外腔压缩激光线宽,将线宽由 4 GHz 压缩到 340 MHz,并可适应大功率激光入射,达到了预期目标。

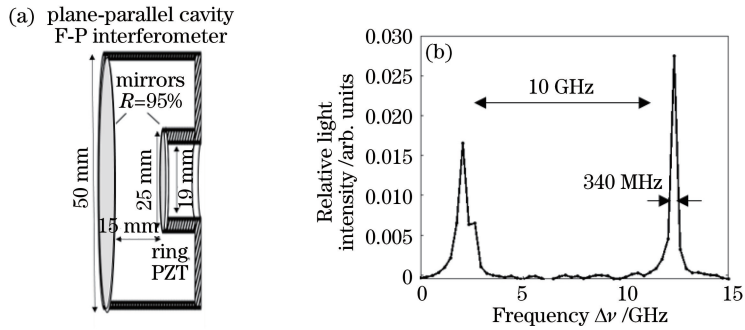


图 5 平行平面腔 F-P 干涉仪的压缩激光线宽测试。(a) 平面平行腔示意图;(b) 线宽压缩测试结果

Fig. 5 Narrow laser linewidth test for parallel-planar cavity F-P interferometer. (a) Schematic of plane-parallel cavity; (b) results of linewidth narrowing test

2.3 碘吸收池标定波长

经过平行平面腔压缩线宽后的激光波长不再由激光器的选频光栅决定,而是由 F-P 腔和光栅共同决定,最终输出波长为 F-P 干涉仪腔长决定的透射峰波长,F-P 干涉仪的波长调谐需要重新进行标定。自制 F-P 腔通过 PZT 调谐,PZT 对腔长的调节存在非线性特性,而 10 ns 的激光脉冲需要进行精度为 100 MHz 量级的在线标定,小型光谱仪及波长计等的波长测量精度和时间响应难以达到该脉冲激光的测量需求。故采用在可见光范围内有丰富谱线的碘分子吸收谱作为参考光谱对线宽压缩后的激光波长进行在线标定。标准碘吸收谱精度优于 0.006 cm^{-1} ,通过实测碘吸收谱与标准谱对比得到波长精度在 10 MHz 量级,满足实验对激光波长的标定需求。

室温下,碘在 611 nm 附近吸收强度弱,信噪比较差,需将饱和碘蒸气池温度提升至 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近,通

过提高碘浓度来增强吸收强度再进行碘吸收谱测量。如图 6 所示,采用碘吸收谱标定经 F-P 干涉仪压缩线宽的激光的波长,将激光用 50:50 分束片等分为两束能量接近的激光,用光电二极管(PD)记录光强,其中一束通过碘吸收池,利用两束光强比值即可计算吸收系数,用 F-P 干涉仪扫描波长,对比标准谱线即可实现对波长的标定。

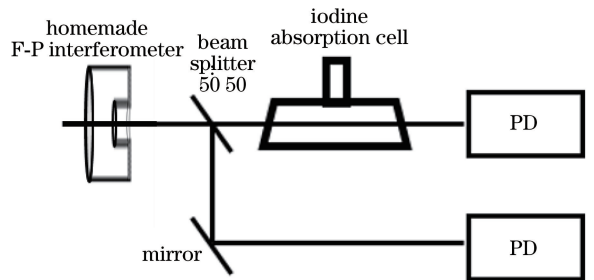
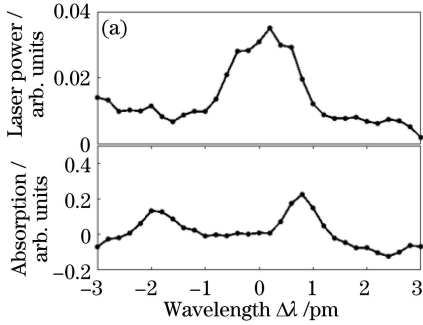


图 6 波长标定实验示意图

Fig. 6 Schematic of wavelength calibration experiment

采用自制 F-P 干涉仪对激光器输出的激光进行二次选频,存在两种波长调谐方案。如图 7(a)所示,保持脉冲染料激光器激光中心波长不变,通过调节自制 F-P 干涉仪腔长来改变透射峰中心波长,所得透射激光光强波动较大,变化曲线由脉冲染料激光器激光线型决定。这种方式的调节范围



受限于自制 F-P 腔自由光谱区(10 GHz)范围。如图 7(b)所示,同步调节 F-P 干涉仪透射峰中心波长和脉冲染料激光器中心波长,可以保持激光功率基本稳定。这种调节方式可进行大范围的波长调谐,不受限于自制 F-P 干涉仪的自由光谱区范围。

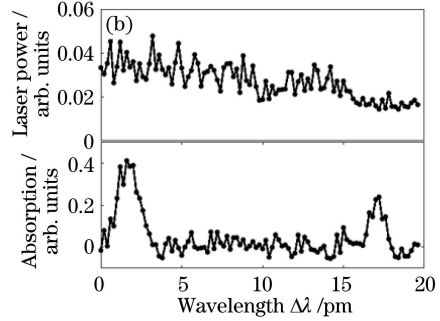


图 7 两种波长调谐方式对比。(a)只有 F-P 干涉仪扫描;(b)激光器与 F-P 干涉仪同步扫描
Fig. 7 Comparison of two wavelength tuning methods. (a) Only F-P interferometer scanning;
(b) dye laser and F-P interferometer scanning

F-P 干涉仪和染料激光器同步扫描,再配合碘吸收池在线标定激光压窄后的中心波长,可以实现更加精细的波长调谐,该套系统使染料激光器波长调谐精度提高到了 100 MHz 量级。

3 实验装置的应用测试

本身外,激光线宽可压缩的脉冲染料激光系统还包括监测激光线型的 F-P 拍照组件、压缩激光线宽及调谐波长的平行平面腔 F-P 干涉仪,以及标定波长的碘吸收池。根据之前提及的氩离子三能级结构,在 611.49 nm 附近进行波长调谐,进行 LIF 诊断,对线宽可压缩的脉冲染料激光系统进行应用测试。

如图 1 所示,经过上述一系列测试,除激光器

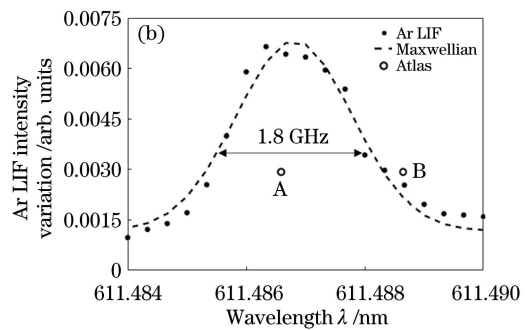
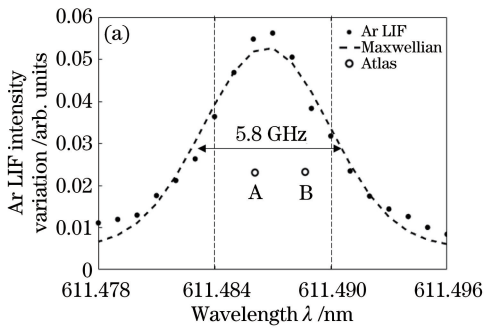


图 8 LIF 诊断系统测量结果。(a)原始激光(4 GHz);(b)压缩后的激光(340 MHz)

Fig. 8 LIF diagnostic system measurement results. (a) Original laser (4 GHz); (b) narrowed laser (340 MHz)

由于测量的谱线展宽是激光线宽与多普勒展宽的卷积,用宽带激光进行 LIF 诊断,谱线明显增宽,需通过反卷积运算获得真实的多普勒展宽,如图 8(a)所示,其中 Atlas 为用于标定波长坐标的碘吸收峰。利用窄带激光进行测量,激光线宽对谱线展宽影响较小,获得的 LIF 光谱有较高的谱分辨率,可直接获得较为准确的离子速度分布函数。图 8(b)得到多普勒展宽约为 1.8 GHz,对应离子温度为 0.1 eV,速度分辨

率可达 200 m/s;而在之前的栅网分析器^[15]测量中得到的离子温度为 0.3 eV。通过对比可知,LIF 诊断系统属非侵入式诊断,对等离子体无扰动,避免了能量栅网分析器的栅网间存在的离子加热过程所引入的误差,有诊断的密度和温度下限低,及时空分辨高的优点,是更加准确和测量范围更广的诊断工具。该套脉冲染料激光器系统在 LIF 诊断中的成功使用表明,其在该类激光光谱测量实验中有良好应用前景。

4 结 论

脉冲染料激光器作为优秀的高能量和可调谐光源,经过线宽压缩后,可应用到更精细的激光光谱测量中。将 F-P 标准具拍照法作为简易的光谱成像手段,完成了激光线型的实时监控和调节;自行设计的平行平面腔 F-P 干涉仪实现了对大功率脉冲激光的线宽压缩和波长调谐,并通过 LIF 诊断系统测试,获得了较准确的离子速度分布函数,速度分辨能力已接近半导体激光器。该套激光系统的搭建,大大提升了脉冲染料激光器的调节效率,并拓宽了其应用范围。

参 考 文 献

- [1] Wang Q, Guo J J, Chen W, *et al.* Widely tunable distributed feedback semiconductor lasers with constant power and narrow linewidth [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0101004.
王琪, 郭锦锦, 陈伟, 等. 功率稳定且波长可调谐的窄线宽分布式反馈半导体激光器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0101004.
- [2] Littman M G, Metcalf H J. Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(14): 2224-2227.
- [3] Shoshan I, Danon N N, Oppenheim U P. Narrowband operation of a pulsed dye laser without intracavity beam expansion [J]. *Journal of Applied Physics*, 1977, 48(11): 4495-4497.
- [4] Littman M G. Single-mode operation of grazing-incidence pulsed dye laser [J]. *Optics Letters*, 1978, 3(4): 138-140.
- [5] Shoshan I, Oppenheim U P. The use of a diffraction grating as a beam expander in a dye laser cavity [J]. *Optics Communications*, 1978, 25(3): 375-378.
- [6] Stern R A, Johnson III J A. Plasma ion diagnostics using resonant fluorescence [J]. *Physical Review Letters*, 1975, 34(25): 1548-1551.
- [7] McMillin B K, Zachariah M R. Two-dimensional argon metastable density measurements in a radio frequency plasma reactor by planar laser-induced fluorescence imaging [J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, 77(11): 5538-5544.
- [8] Hill D N, Fornaca S, Wickham M G. Single frequency scanning laser as a plasma diagnostic [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1983, 54(3): 309-314.
- [9] Severn G D, Edrich D A, McWilliams R. Argon ion laser-induced fluorescence with diode lasers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 69(1): 10-15.
- [10] Goeckner M J, Goree J, Sheridan T E. Laser-induced fluorescence characterization of a multidipole filament plasma [J]. *Physics of Fluids B: Plasma Physics*, 1991, 3(10): 2913-2921.
- [11] Yan G Y, Lin Y Q, Qin L J, *et al.* Measurement of the output linewidth of a dye laser pumped by N₂ laser [J]. *Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences)*, 1980(1): 55-60.
严光耀, 林远齐, 秦莉娟, 等. 氮激光泵浦染料激光器输出线宽的测量 [J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 1980(1): 55-60.
- [12] Du S S, Wang Y M, Tao R. Multiple beam interferential spectral imaging technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0830003.
杜述松, 王咏梅, 陶然. 多光束干涉光谱成像技术 [J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0830003.
- [13] Fu J S. Frequency stabilization of CW dye laser with reference cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1985, 12(8): 510-511.
傅济时. 连续染料激光器的外腔稳频 [J]. *中国激光*, 1985, 12(8): 510-511.
- [14] Zhu M, Hall J L. Stabilization of optical phase/frequency of a laser system: application to a commercial dye laser with an external stabilizer [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1993, 10(5): 802-816.
- [15] Hu G H, Jin X L, Zhang Q F, *et al.* Measurement of ion temperature by ion-acoustic waves Landau damping in oxide cathode plasma [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(18): 189401.
胡广海, 金晓丽, 张乔枫, 等. 利用离子声波朗道阻尼测量氧化物阴极放电中的离子温度 [J]. *物理学报*, 2015, 64(18): 189401.