

文章编号 1004-924X(2011)02-0310-06

纳秒级激光脉冲展宽系统的分析及应用

张振荣,胡志云,黄梅生,叶景峰,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:建立了一种纳秒级多腔式激光脉冲扩展系统。通过激光脉冲展宽,该系统可以有效降低脉冲激光的峰值功率,从而在激光燃烧诊断实验中避免激光诱导等离子体的产生,减少背景干扰,有效提高信噪比。建立了理论模型,对影响脉冲展宽的分束比、腔长以及光学腔个数等几个主要参数进行了分析,并通过数值计算实现了各参数的优化。利用建立的多腔串联式激光脉冲展宽器,对 Nd:YAG 脉冲激光器二倍频激光进行了脉冲展宽,将脉宽为 7.8 ns 的脉冲激光分别展宽为 17,35 和 72 ns,激光的峰值功率最大可降低为原激光峰值功率的 9% 左右,并保持了较好的光束质量。将该展宽器应用于自发喇曼散射实验中,很好地解决了激光诱导击穿光谱对喇曼信号的干扰,取得了较好的实验结果。

关键词:YAG 激光;脉宽展宽;光学腔;拉曼散射

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111902.0310

Analysis and application of nanosecond laser pulse stretching system

ZHANG Zhen-rong, HU Zhi-yun, HUANG Mei-sheng,
YE Jing-feng, LIU Jing-ru

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

Abstract: A multi-cavity passive nanosecond laser pulse stretching system was designed. The system could reduce laser peak powers and avoid the laser induced plasma spark, so that it reduces background interference and improves the signal to noise ratio in combustion diagnostics. The theoretical model of the pulse-stretching process for an arbitrary number of optical ring cavities was introduced, and several key parameters that affect on pulse width, beam-splitter reflectivity, cavity length and total number of optical cavities were analyzed. Finally, the designed multi-cavity laser pulse stretcher was used in broadening the Nd:YAG laser harmonic pulse width. Results indicate that a 7.8 ns input laser pulse has been converted into approximately the output laser pulses in 17 ns, 35 ns and 72 ns, respectively. Furthermore, the laser peak power has been reduced to 9% of the original laser peak power, meanwhile, it maintains the good beam quality. The stretcher was also used in the spontaneous Raman scattering experiments, and results show it well resolves the laser induced breakdown spectroscopy of the Raman signal and achieves good results.

Key words: YAG laser; pulse stretching; optical cavity; Raman scattering

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-30.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKL110905)

1 引言

对高能脉冲激光进行脉冲整形具有重要的意义,它可以很好地拓展高能脉冲激光的使用范围,使其更好地为人们服务。基于激光的燃烧诊断技术不干扰流场,能够实现流场参数高时、空分辨在线测量。作为激光燃烧诊断技术分支之一的自发喇曼散射技术能够在线测量燃烧场主要组分及温度信息,因而在复杂的湍流场和化学反应流场诊断中具有重要的地位^[1-4]。目前,用于自发喇曼散射技术的激光源主要有准分子激光器和调QNd:YAG激光器。以这类高能脉冲激光作为激励源,可以有效提高信号强度,但高能激光往往会引起聚焦区域气体介质击穿,产生等离子体光谱^[5]。等离子体强烈的光学辐射会干扰甚至完全淹没微弱的喇曼散射信号。为了解决这一问题,国外有实验室使用闪光灯泵浦的染料激光器作为激光光源^[2],实现了长脉冲输出。也有实验室对高能纳秒级调Q激光器的激光脉冲进行整形,通过脉宽展宽实现了在保持激光脉冲能量基本不变的条件下有效降低激光的峰值功率^[6-7]。由于自发喇曼散射技术的信号强度与激光的脉冲总能量成正比,而与峰值功率无关,所以利用脉冲整形技术扩展激光脉冲宽度,可实现在基本保持信号强度的条件下消除激光诱导等离子体的产生,提高信噪比。

国内类似的研究主要针对惯性约束聚变(ICF)对激光光源的特殊要求,对原始激光脉冲进行相应的整形^[8-9],尚未有人针对激光燃烧诊断技术的特殊需要开展相关研究工作。本文基于部分反射的光学环形腔,通过激光多脉冲延时叠加的方法实现激光脉宽展宽,从而达到降低激光峰值功率的目的。在实验室建立了一套脉冲展宽系

统,测量了脉冲扩展过程中激光脉冲线型、激光光斑以及激光能量的变化情况。将该展宽器应用于改善自发喇曼散射实验中激励激光的时间特性,取得了较好的实验结果。

2 基本原理

脉冲展宽的原理是基于部分反射的光学环形腔,其几何结构可以是矩形、三角形或其它形状。图1所示为矩形环形腔示意图,主要由分束镜(BS)、反射镜(M)组成。脉冲激光以 45° 入射到分束镜BS表面后被分束镜分为反射和透射两部分。透射光进入光学腔内并在腔内循环,每循环一周,将有一定的激光透射,透射率为 $(1-R_{BS})$ 。这些透射光与第一次反射的激光在空间上相互重叠,在时间上按照一定的时间序列排列,形成一个较宽的激光脉冲,从而实现对激光脉宽的展宽。

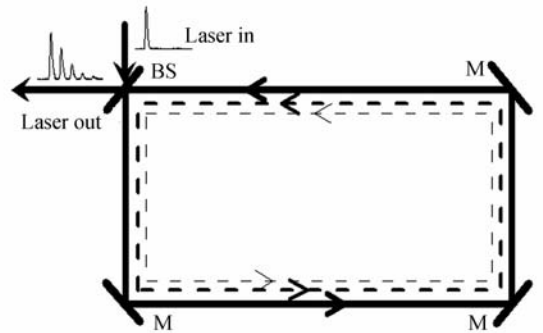


图1 单腔式激光脉冲展宽示意图

Fig. 1 Schematic of one ring cavity used as a pulse stretcher

假设原始的激光脉冲函数为 $I_0(t)$,经过光学腔后激光脉冲函数为 $I(t)$,理论分析可得 $I(t)$ 的表达式:

$$I(t) = R_{BS} I_0(t) + (1 - R_{BS})^2 I_0(t - \tau) + (1 - R_{BS})^2 R_{BS} I_0(t - 2\tau) + \dots = R_{BS} I_0(t) + (1 - R_{BS})^2 \sum_{n=1}^N (R_{BS})^{n-1} I_0(t - n\tau), \quad (1)$$

式中, R_{BS} 为分束镜的反射率; τ 为光学腔对激光脉冲的延迟时间,它与光学腔的腔长成正比; N 表示激光脉冲在光学腔内的循环次数。上式中右边第一项代表由分束镜反射形成的光脉冲,第二

项为激光在光学腔内循环一次后的透射光,第 N 项为激光在光学腔内循环 $N-1$ 次后的透射光。由式(1)可知,对于单个光学腔,影响激光脉冲输出函数的主要因素有分束镜的反射率和光学腔的

腔长两方面。

由于单个光学腔的脉冲展宽能力有限,所以要实现较理想的激光脉冲展宽,一般需要多个光学腔。这些光学腔相互串联,前一个光学腔的输出作为后一个光学腔的输入。与上面的分析类似,脉冲激光经过第 i 个光学腔后,激光脉冲的函数 $I_i(t)$ 表达式为:

$$I_i(t) = R_{\text{BS}}^i I_{i-1}(t) + (1 - R_{\text{BS}}^i)^2 \sum_{n=1}^N (R_{\text{BS}}^i)^{n-1} I_{i-1}(t - n\tau_i), \quad (2)$$

式中的 R_{BS} 表示第 i 个光学腔中分束镜的反射率,一般情况下,各个光学腔的 R_{BS} 均相等, τ_i 表示第 i 个光学腔对激光脉冲的延迟时间。由此可知,影响脉冲展宽效果的主要因素有 3 个方面:(1)各个光学腔的腔长;(2)分束镜的分束比;(3)光学腔的数量。本文分别分析了这 3 个参数对展宽效果的影响,并进行了相应的优化。

3 数值计算

3.1 分束镜分束比对脉冲展宽效果的影响

为了研究光学腔内分束镜的分束比对激光脉冲展宽效果的影响,针对单个光学腔,根据式(1),计算了分束镜反射率为 20%~80% 时激光脉冲的展宽效果。理论上,式(1)适合于任何形状激光脉冲,实际模拟过程中,本文以所需展宽激光的脉冲线型为基础,进行数值计算。计算过程中假定光学腔的长度等于输入激光脉宽对应的光程,数值计算结果显示这种假设是合理的。图 2 给出了部分计算结果,从图中可以看出,对于单个光学

腔,当分束镜的反射率为 38% 时激光脉冲的展宽效果最好,此时,激光的峰值功率降到了单个光学腔所能达到的最小值。

3.2 腔长对脉冲展宽效果的影响

基于分束比的计算结果,分析了光学腔腔长对激光脉宽展宽效果的影响。设光学腔腔长与输入激光脉冲对应的光程之间的比例为 n ,图 3 所示为理论计算的不同 n 值条件下的展宽效果。从图中可以看出,输出激光的脉冲宽度随着 n 值的增大而逐渐加宽。当 $n < 1$ 时,激光的峰值功率随 n 值的增大有明显的降低,当 $n \geq 1$ 时,激光的峰值功率随 n 值的增大变化不大。而脉宽展宽的主要目的是降低激光的峰值功率,单纯的脉宽展宽意义不大。因此,取 $n=1$ 是比较理想的。

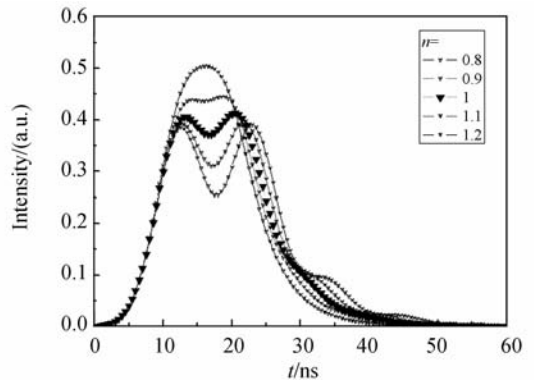


图 3 腔长对展宽效果的影响

Fig. 3 Calculated output profiles for different cavity lengths

3.3 光学腔个数的影响

以上的计算基于单个光学腔的假设,但其计算结果可推广到任意多个光学腔。图 4 为脉冲激光经过不同数量的光学腔后脉冲宽度的变化情

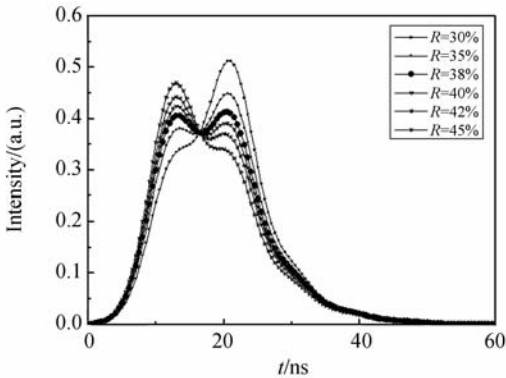


图 2 分束比对展宽效果的影响

Fig. 2 Calculated output pulse-shapes with different beam-splitter reflectivities

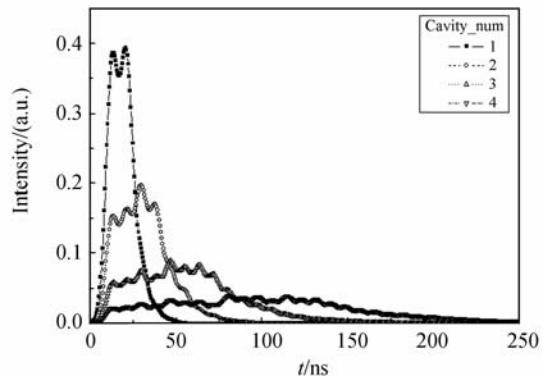


图 4 腔个数对展宽效果的影响

Fig. 4 Effect of number of cavities on output profiles

况。从图中可以看出,随着光学腔数量的增加,激光的脉宽成倍增加,同时,激光的峰值功率做相应的下降。当光学腔数量为3时,其脉宽接近原来的激光脉宽10倍,相应的峰值功率小于原峰值功率的10%。当光学腔的数量进一步增加时,激光的峰值功率会变得更低,但当光学腔数量大于3时,展宽器件的设计加工及调试等变得十分困难。实际使用时需根据实验所需选择合适的光学腔数量。

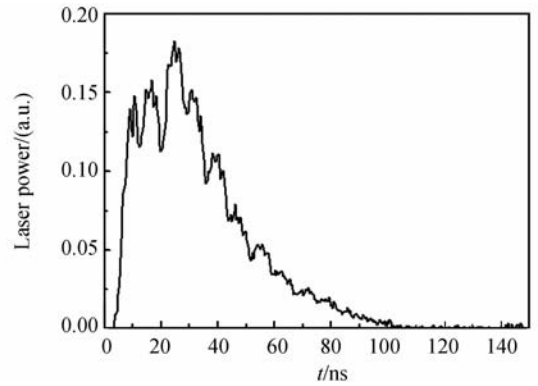
4 结果分析及应用

根据以上分析与计算,结合Nd:YAG脉冲激光器二倍频激光的一些实际参数指标,设计了一套多腔串联式激光脉冲展宽器。每个光学腔中分束镜的反射率均为38%(针对S分量)。该展宽器由3个相互串联的光学腔组成,各个光学腔可以单独或组合使用。其中第一个光学腔腔长为232 cm,第二个光学腔腔长为504 cm,第三个光学腔腔长为1 065 cm。展宽前的激光脉宽约为7.8 ns,对应的光程为234 cm,与第一个光学腔长度相当。

4.1 展宽效果分析

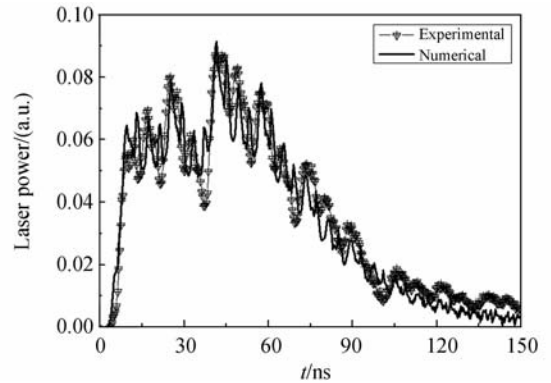
4.1.1 激光脉宽测量

图5为实验测得的展宽后的激光脉冲线型。其中,图5(a)为激光脉冲经过第一个光学腔后激光脉冲的展宽效果。第一个光学腔腔长与激光脉宽对应的光程基本相等,展宽后的激光脉宽为17 ns,峰值功率约降为原始激光峰值功率的40%。图5(b)为激光经过两个光学腔后的脉冲线型,激光脉宽为35 ns,峰值功率约为原始激光峰值功率的18%。图5(c)为激光脉冲依次经过3个光学



(b) 双腔

(b) Two-cavity



(c) 三腔

(c) Three-cavity

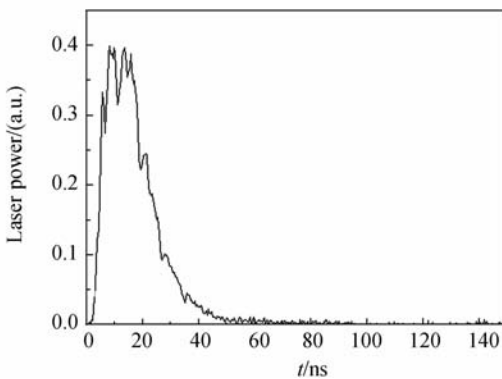
图5 展宽后的激光脉冲线型

Fig. 5 Measured temporal profiles of stretched-pulse output

腔后最终展宽后的脉冲线型及其理论拟合结果,从中可以看出理论计算结果与实验测量数据吻合较好。另外,通过测量可知,经过3个光学腔展宽后激光脉冲的宽度为72 ns,峰值功率约为展宽前峰值功率的9%。

4.1.2 展宽后的激光光斑

经过脉冲展宽后的激光光束是由多束激光合成的,这些激光束在时间上按照一定时间序列排列,在空间上相互重叠。光束在空间上的重叠情况反应在展宽后的激光光斑上,理想情况下,展宽后的激光光斑应与原激光光斑相似,仍为高斯形分布。图6为实验测得的经过3次展宽后的激光光斑,从图上可以看出,激光能量的空间分布基本不变,只是激光光斑的尺寸较原光斑有所增大,原始光束直径为8 mm,展宽后激光光束直径约为11 mm,说明该展宽器基本保持了原激光的光束质量。



(a) 单腔

(a) Single-cavity

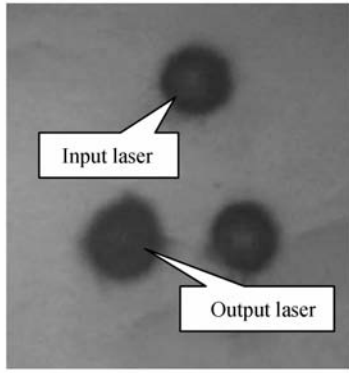


图 6 展宽前后的激光光斑

Fig. 6 Measured laser spots of input laser and output laser

4.1.3 激光能量测量

使用激光脉冲展宽器的目的是降低激光的脉冲功率,但同时应尽可能地保持激光的脉冲能量不变,所以该器件对激光能量的衰减也是衡量器件质量的一个重要指标。实验中,在输入单脉冲激光能量为 380 mJ 的条件下,获得了 293 mJ 的激光脉冲能量输出,效率约为 77%。

4.2 在喇曼散射实验中的应用

图 7 为基于脉宽展宽的自发喇曼散射实验系统,激光源为倍频 Nd:YAG 激光,原始脉冲宽度约 7.8 ns,经展宽后脉冲宽度约为 72 ns。图中 L_1 为聚集透镜,焦距 500 mm, L_2 为收集透镜, M 为反射镜。喇曼散射信号由收集透镜收集并经过陷波光谱滤光片滤波后进入光谱仪。

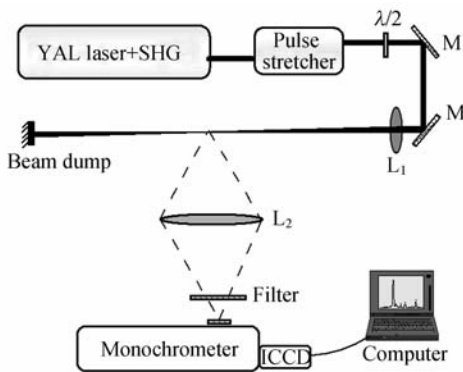


图 7 自发喇曼散射实验系统

Fig. 7 Schematic of Raman scattering system

实验中,将激光单脉冲能量输出调为 290 mJ,展宽后的激光脉冲能量约为 220 mJ。经聚焦透镜聚焦后,焦斑直径约为 0.3 mm。此时,在空气中没有击穿现象发生。

图 8 为上述实验系统在空气中获得的喇曼光谱,由于激光脉宽展宽,有效降低了峰值功率,基本消除了激光诱导等离子体光谱对喇曼散射信号的干扰,实验获得了高信噪比的喇曼散射信号。

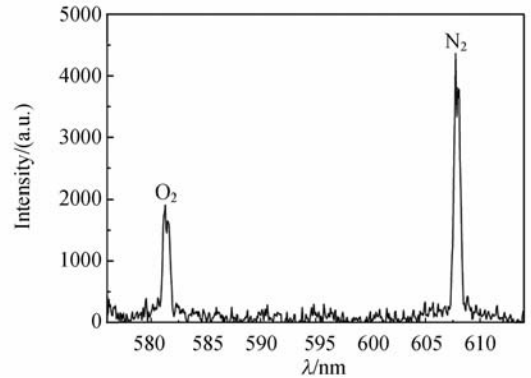


图 8 空气中的喇曼光谱

Fig. 8 Raman spectrum of room air

5 结 论

本文介绍了一种纳秒级激光脉冲展宽系统。该系统基于部分反射的光学腔设计,使用单个光学腔。分析计算了影响展宽效果的各种技术参数,认为当光学腔的腔长等于输入激光脉冲对应的光程,分束镜的反射率约为 38% 时,展宽效果最好。对所设计的多腔串联式脉冲展宽系统的测试结果表明,该系统能够较好地实现对纳秒级脉冲激光的脉宽进行展宽,在激光能量衰减不大的前提下有效降低激光的峰值功率,而且展宽前后激光光束质量基本保持不变。将该展宽器应用于自发喇曼散射实验系统中,实现了将脉冲宽度为 7.8 ns 的脉冲激光展宽为约 72 ns,使激光的峰值功率降低为原峰值功率的 9% 左右,基本消除了激光诱导击穿光谱的发生,获得了信噪比高的喇曼光谱。

参考文献:

[1] ERHARD W, ROTHE P A. Application of tunable excimer lasers to combustion diagnostics: a review[J]. *Appl Opt*, 1998, 36(18):3971-4031.

[2] GITTINS C M, SHENOY S U, ALDAG H R. Measurements of major species in a high pressure gas turbine combustion simulator using Raman scattering[R]. *AIAA*, 2000-0772.

- [3] KOJIMA J, NGUYEN Q V. Spontaneous Raman scattering diagnostics for high-pressure gaseous flames[R]. *AIAA*, 2002-3041.
- [4] CHEHROUDI B, COHN R, TALLEY D, *et al.*. Raman scattering measurements in the initial region of sub- and supercritical jets [R]. *AIAA*, 2000-3392.
- [5] CHEN Y L, LEWIS J W L. Visualization of laser-induced breakdown and ignition [J]. *Opt Exp*, 2001,9:360-372.
- [6] HARIGEL G, BALTAY C, BREGMAN M, *et al.*. Pulse stretching in a Q-switched ruby laser for bubble chamber holography[J]. *Appl Opt*, 1986, 25:4102-4110.
- [7] KOJIMA J, NGUYEN Q V. Laser pulse-stretching with multiple optical ring cavities[J]. *Appl Opt*, 2002,41(30):6360-6370.
- [8] 王双义,吕志伟,林殿阳,等. KrF 激光脉冲整形研究[J]. *强激光与粒子束*,2005,17(11):1669-1673. WANG SH Y, LU ZH W, LIN D Y, *et al.*. KrF laser pulse shaping by pulse stacking [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(11): 1669-1673. (in Chinese)
- [9] 纪帆,随展,李锋,等. 时域延时多脉冲叠加平滑过程的分析[J]. *强激光与粒子束*,2006,18(3):1669-1673. JI F, SUI ZH, LI F, *et al.*. Analysis of pulse smoothing by multi-pulse interference in time domain [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006,18(3):1669-1673. (in Chinese)

作者简介:

张振荣(1974—),男,陕西蒲城人,副研究员,1997年于西北工业大学获得学士学位,2004年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: nintzzr@163.com

胡志云(1969—),男,河南人,博士研究生,高级工程师,1993年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1998年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: ninthzy@163.com

黄梅生(1970—),女,福建人,实验师,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: ninthms@163.com

叶景峰(1979—),男,河南西平人,助理研究员,2001年、2004年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: leafey1979@163.com

刘晶儒(1945—),女,辽宁沈阳人,研究员,1967年毕业于哈尔滨工业大学,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: liujingru2k3@vip.sina.com