

聚焦型布里渊池受激散射脉冲的时间特性*

韩 勇 谭吉春

丁 磊 景 峰 张小民

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073) (中国工程物理研究院核物理与化学研究所 成都 610003)

提要 对单个聚焦结构布里渊池后向散射(反射)脉冲时间特性开展实验研究,观测到相位共轭保真度的时域变化,并用两个布里渊池合成得到具有较高对比度的脉冲波形。结果表明:单池反射脉冲波形敏感地依赖于泵浦能量和聚焦参数。反射脉冲前沿被陡化和压缩,脉冲前沿起点时间随泵浦能量提高而提前,变化范围约为 1.5 ns。验证实验表明利用多个布里渊池实现脉冲时间整形方案在原理上是可行的。

关键词 受激布里渊散射,相位共轭保真度,核聚变驱动脉冲时间整形

1 引 言

受激布里渊散射(SBS)的相位畸变校正能力使其在高功率固体激光装置中受到广泛重视,但因后向散射(反射)脉冲相对于泵浦脉冲时间波形产生较难控制的变化而限制了它的应用范围。对于使用在多程激光放大器中的某种结构设计适当的相位共轭镜(PCM),原则上可以在激光系统前端最初的脉冲时间整形时计入反射脉冲波形的这种变化,从而在放大器输出端得到需要的脉冲波形^[1]。因此,研究反射脉冲波形的变化特点或规律可以为最终解决应用SBS相位共轭技术所关心的脉冲波形控制问题提供依据。

一般说来,对于给定参数的入射脉冲,反射脉冲时间波形上升沿、时间起点、脉宽以及振幅调制度等参数的变化和稳定性反映了相位共轭镜的波形控制能力。本文在两种聚焦参数和不同泵浦能量等实验条件下研究了单个布里渊池后向散射脉冲的波形特征,分析了泵浦能量和聚焦参数对反射脉冲波形产生影响的原因;观测了相位共轭保真度的时域变化特点;并利用两个布里渊池的输出脉冲合成得到了具有较高对比度的脉冲波形,从原理上探讨了使用多个布里渊池实现脉冲时间整形的可行性。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。一台 Nd:YLF 被动调 Q 环形振荡器以单横模、单轴模运转,空间滤波器输出光束直径约为 12.4 mm,石英 1/4 波片使入射光束由水平线偏振变为圆偏振,光束经第二台放大器,在 1.054 μm 波长处可得到最大输出能量约为 100 mJ,宽度为 18 ns 的激光

* 高技术 416-2 专题资助项目。

收稿日期: 1997-12-01; 收到修改稿日期: 1998-04-06

脉冲(图2)。一块经稀氢氟酸溶液腐蚀过的玻璃载片用于增大光束的相位畸变,然后该光束被聚焦到布里渊池中。当后向散射的圆偏振光脉冲再次通过相位板和放大器时,相位畸变得得到补偿;光束反向通过 $1/4$ 波片变为垂直线偏振后从偏振片倒出。所使用的布里渊池长度分别为 50 cm 和 150 cm,入口处会聚透镜的焦距分别为 40 cm 和 120 cm,池长均大于焦距,非线性介质均为四氯化碳(CCl_4)。带宽为 500 MHz 的数字示波器和上升时间小于 0.3 ns 的快响应光电管用于记录时间数据。

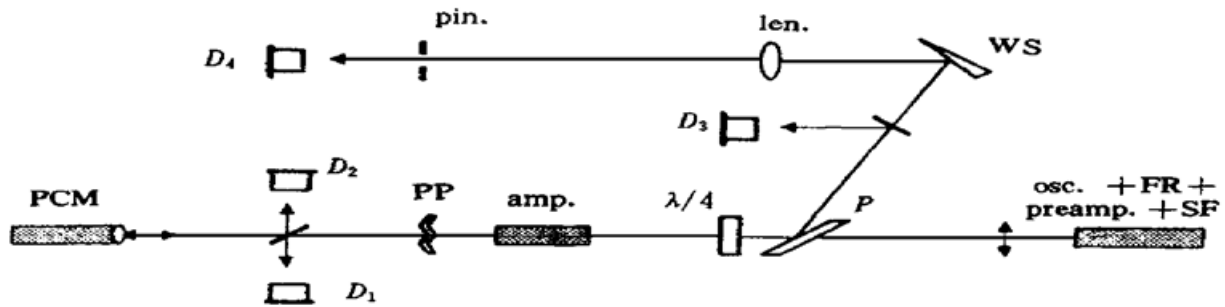


图 1 受激布里渊散射实验光路

Osc. + FR + Preamp. + SF: 振荡器, 法拉第隔离器, 预放大器和空间滤波器组合; P : 偏振片;
amp.: 放大器; PP: 相位板; PCM: 布里渊镜; WS: 尖劈; len.: 透镜; pin.: 针孔; D : 光电管

Fig. 1 Schematic layout of SBS experiments

Osc. + FR + Preamp. + SF: Oscillator, Farady rotator, Preamplifier and Spatial filter; P : polarizers;

p.: Amplifier; PP: Phase plate; PCM: Brillouin mirror; WS: Wedge splitter; len.: Lens; pin.: Pinhole; D : Detectors

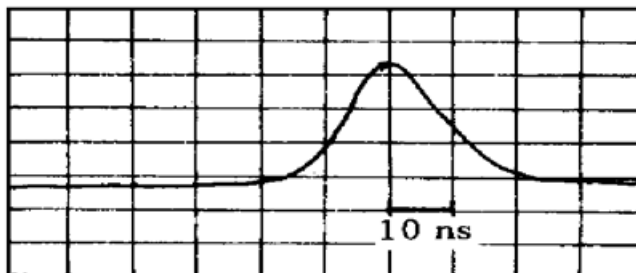


图 2 泵浦脉冲时间波形

Fig. 2 Temporal shape of the pump pulse

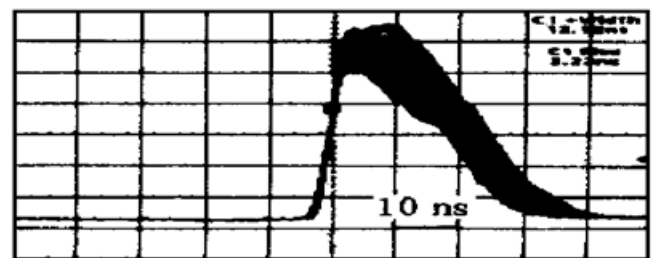


图 3 20 个反射脉冲时间波形

($f = 40$ cm, 阴影中实线为幅度均值)

Fig. 3 20 reflection pulses

$f = 40$ cm, solid line in the shadow denotes the mean value)

3 实验结果

3.1 泵浦能量和聚焦参数对反射脉冲波形的影响

作为比较依据,首先在 D_1 处测量得到入射脉冲时间波形,它具有图 2 所示的典型高斯形状;对焦距为 40 cm 的布里渊池,泵浦能量从 12 mJ 逐渐变化到 17.5 mJ(约 4~6 倍阈值),在 D_2 处测量得到图 3 所示的一组共 20 个反射(斯托克斯)脉冲波形;图 4 则给出在 D_2 处测量得到的焦距为 120 cm 的布里渊池反射脉冲波形随泵浦能量增加而演化的图像。

与入射脉冲比较,对于不同的泵浦能量和聚焦参数,反射脉冲的共同特点是:(1) 前沿显著陡化,前沿上升时间显著减小;(2) 预脉冲噪声水平极低;(3) 脉冲波形展现出某种周期性调制。

在所用泵浦能量范围内,对两种布里渊池,反射脉冲前沿上升时间基本均随泵浦能量单调

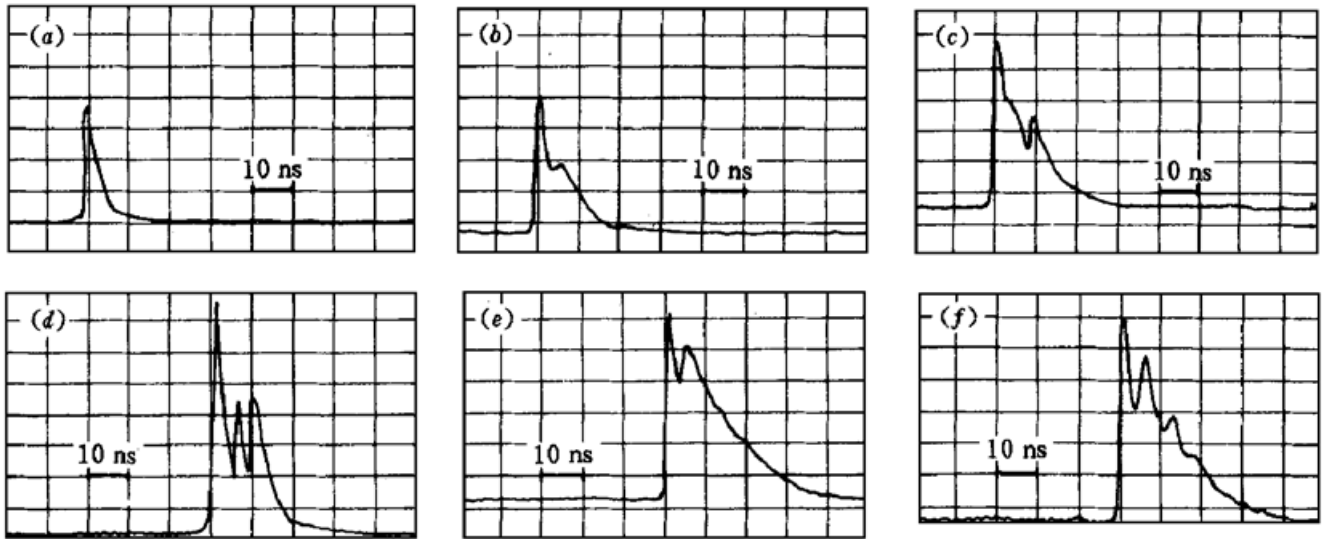


图 4 反射脉冲的时间波形 ($f = 120 \text{ cm}$)

Fig. 4 Reflection pulses (focal length $f = 120 \text{ cm}$)

(a) $\epsilon_p = 6 \text{ mJ}$; (b) $\epsilon_p = 9 \text{ mJ}$; (c) $\epsilon_p = 12 \text{ mJ}$; (d) $\epsilon_p = 15 \text{ mJ}$; (e) $\epsilon_p = 24 \text{ mJ}$; (f) $\epsilon_p = 37 \text{ mJ}$

下降, 反射脉冲宽度和峰值功率(计入相对衰减比的影响后)均随泵浦能量单调增加。

但两种焦距的布里渊池反射脉冲又有各自特点: 对焦距为 40 cm 的布里渊池, 当泵浦能量由 4 倍阈值变化到 6 倍阈值时, 反射脉宽较泵浦脉宽平均窄化约 6 ns, 反射脉宽的起伏量约为其均值的 1/7; 反射脉冲相对于泵浦脉冲峰值功率变化不大, 反射脉冲峰值功率最大起伏量约为其均值的 1/3; 脉冲波形最大调制周期约为 4 ns, 调制周期和调制深度均随泵浦能量增加而大致减小, 波形逐渐变得光滑。对焦距为 120 cm 的布里渊池, 当泵浦能量较低时, 反射脉冲只有一个很窄的、尾部平滑的单峰, 见图 4(a), 脉宽被压缩约 4 倍; 随着泵浦能量的提高, 反射脉冲开始都有一个高强度的尖峰, 瞬时功率反射率可以远大于 1; 反射脉冲宽度基本随泵浦能量单调增加, 在一定泵浦能量下开始超过泵浦脉宽, 见图 4(f); 反射脉冲波形展现出类似于图 3 紧聚焦入射下的周期性调制现象, 调制深度不规律地变化, 总的来说深度范围较图 3 大得多。下面作几点讨论。

3. 1. 1 反射脉冲前沿陡化

在入射脉冲开始阶段, 介质中激光强度很低, 很少部分的能量转换为布里渊信号, 随着池中激光强度的增加, 声波场以非线性方式很快建立起来, 这个过程迅速饱和, 入射激光高效地转换为散射波, 导致反射脉冲前沿陡化。

3. 1. 2 反射脉冲前沿时间起点

根据文献[2, 3]的分析, 饱和泵浦下, SBS 过程进入准稳态以后, 高比例转换主要发生在布里渊池入射端介质中很浅的区域, 反射脉冲波形是紧密跟随泵浦脉冲波形变化的。因此对于图 3 所示的一组反射脉冲, 其前沿起点时间是随泵浦能量增加而提前的, 变化范围约 1.5 ns。这和文献[3, 4]给出的数值模拟结果在量级上是一致的, 这种前沿起点时间的不稳定性是 SBS 阈值效应导致的。单个聚焦结构布里渊池反射脉冲前沿起点时间对泵浦能量如此敏感, 采用这种简单相位共轭镜难以达到聚变激光驱动器几十个束脉冲前沿之间的时间同步误差小于 10~ 20 ps 的技术要求。

3.1.3 反射脉冲波形调制

受激布里渊散射光起源于自发布里渊散射噪声^[3-5],而自发布里渊散射光功率线性依赖于泵浦光功率,因此,后向散射光强度随自发布里渊噪声种子的强度水平周期性地增长和衰减是导致反射脉冲波形产生周期性调制的原因。调制周期则与有效相互作用长度 l 有关,有效相互作用长度可以理解为光栅厚度,调制周期 T 近似为 $2nl/c$ 。泵浦功率提高时,相互作用区从焦点区域向入射窗口方向移动,动态光栅厚度变薄,调制周期减小,这符合图3与图4(a)~(d)的实验结果。

3.1.4 长焦布里渊池的脉冲压缩和波形特点

通过合理选择介质参数和布里渊池结构,可以使入射脉冲的大部分能量转换入第一个高强度峰。在高能量泵浦下,反射脉冲宽度增加以至超过入射脉冲宽度,见图4(f),这是因为泵浦光束的远场旁瓣的功率超过了SBS阈值,而中心的低频空间成分首先被反射,因此泵浦脉冲的空间结构改变了反射脉冲的时间结构。长焦布里渊池反射脉冲的调制周期和调制深度的不规律变化(如图4(e),(f)所示)也与这种机制有关。

3.2 反射脉冲功率角分布特性的观测

稳态近似(泵浦脉宽/声子寿命 $\gg 1$)下,相位共轭保真度定义为下述归一化值:畸变补偿后的后向散射脉冲远场主瓣能量(功率)与散射脉冲全部能量(功率)之比,并且这个比值被相位畸变前的入射(泵浦)脉冲同样的比值所归一化。利用“桶中能量”法可测量相位共轭保真度。

但SBS是一个瞬态过程,为此在图1中 D_3, D_4 位置(小孔后)分别测量泵浦能量为17 mJ(≈ 6 倍阈值)时的反射脉冲波形。通过比较相位补偿脉冲的远场主瓣和其近场的波形(图5)可看出,在反射脉冲前沿和高强度顶部对应的时刻,分布在小孔内(θ 角内)的功率和全部功率之比发生了较明显的变化(利用分时测量技术能够给出更准确的信息)。根据振荡器输出波形和空间滤波器输出波形的比较结果,布里渊池的泵浦波空间模式基本不随时间变化,因此图5给出的结果显示:(1)反射脉冲前沿保真度较低。其起因可能是在反射脉冲开始形成时,泵浦脉冲功率反射率较低,泵浦光束远场低水平旁瓣尚不能被反射,反射光束中的高频成分缺失,高精度相位共轭不能实现;(2)脉冲顶部保真度较低。这可能是因为在高强度泵浦下更多的非共轭噪声模式得到放大,反射脉冲中相位共轭模式的含量降低,并且上游的泵浦损耗改变了透射到SBS引发区的泵浦光的衍射干涉形式,使种子光不再具有泵浦光束的特性。

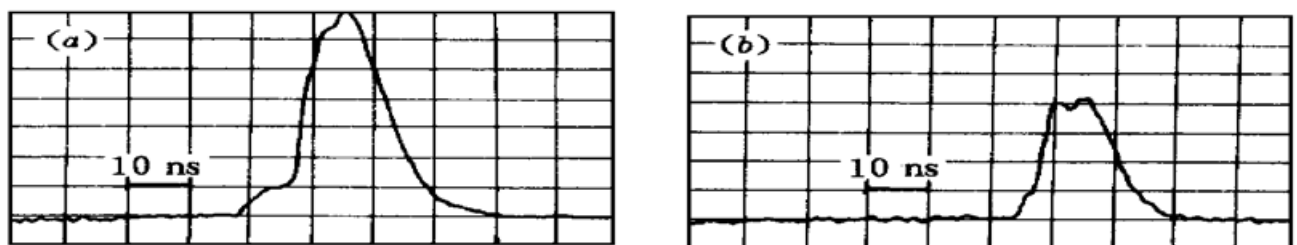


图5 (a) D_3 处测量的反射脉冲时间波形; (b) 小孔后测量的反射脉冲时间波形

Fig. 5 (a) Reflection pulse measured at D_3 ; (b) Reflection pulse measured behind a pinhole

3.3 用脉冲合成法实现脉冲时间整形的原理性验证

文献[6]报道了利用80个布里渊镜列阵实现脉冲波形任意整形的新方法。本文用焦距为40 cm和120 cm的两个布里渊池对这种波形合成方案原理进行了验证。通过调整两池之间的光学延迟和能量分配,得到了具有较高对比度的脉冲波形,如图6(a),(b)所示。其中图6(a)

中两池之间的光学延迟量较大, 反射脉冲对比度达到 $15 \cdot 1$ 。更高对比度的测量受限于光电管的动态范围。

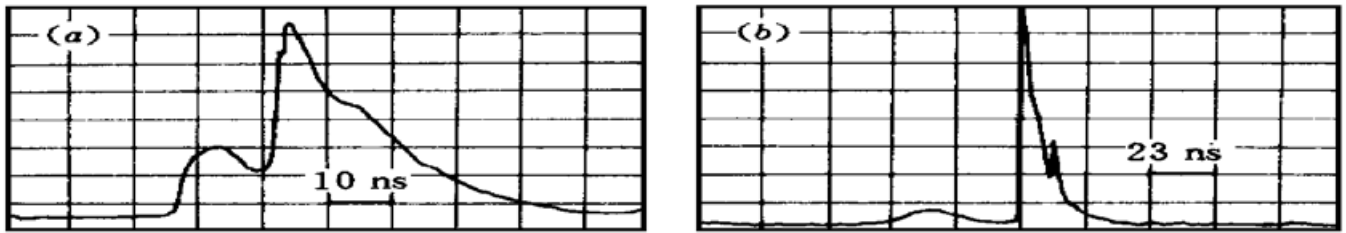


图 6 两个布里渊池反射脉冲波形的叠加

(a) 泵浦能量比 = $1 \cdot 9$; (b) 泵浦能量比 = $1 \cdot 4$

Fig. 6 Reflection pulses from two cells

(a) pump energy ratio = $1 \cdot 9$; (b) pump energy ratio = $1 \cdot 4$

这个验证实验仅能从定性角度说明: 把多个布里渊池输出的脉冲加以组合, 在适当条件下合成所需要的波形原理上是可行的, 但发现合成脉冲对比度对于泵浦能量非常敏感。为了用多脉冲组合得到既定的合成波形, 有必要采取专门措施确保各单池工作点处于事前选定的状态, 通常应使各单池工作在饱和区。

4 结 论

1. 对使用四氯化碳介质的单个布里渊池, 短焦池(如 $f = 40 \text{ cm}$) 反射脉冲能更好地再现泵浦脉冲波形, 长焦池(如 $f = 120 \text{ cm}$) 存在强烈的周期调制现象;
2. 以自发布里渊散射噪声光作为种子的布里渊池的反射脉冲前沿起点时间敏感地依赖于泵浦能量;
3. 在一个泵浦脉冲内, 相位共轭保真度随时间而变化;
4. 利用多个布里渊池实现脉冲时间整形原理上是可行的。

总的来说, 聚焦型布里渊池的脉冲波形控制能力较差。后向注入种子的聚焦结构布里渊池和锥形光波导布里渊池的脉冲波形控制能力可能比本文所用布里渊池为好, 但有待下一步从实验和理论方面开展深入研究。

参 考 文 献

- 1 V. E. Yashin. Problems of SBS phase conjugation application in large scale fusion laser facilities. *SPIE*, 1995, **2633**: 412~ 420
- 2 W. Kaiser, M. Maier. Stimulated Reyleigh, Brillouin and Raman scattering spectrum. *Laser Handbook*, Vol. 2, Edited by F. T. Arecchi, E. O. Schulz-Dubois. Amsterdam: N. Holland Pub. Co., 1972. 1077
- 3 G. J. Grofts, M. J. Damzen, R. A. Lamb. Experimental and theoretical investigation of two-cell stimulated-Brillouin-scattering systems. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(11): 2282~ 2288
- 4 John. J. Ottusch, David A. Rockwell. Stimulated Brillouin scattering phase-conjugation fidelity fluctuations. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6): 369~ 371
- 5 G. J. Wen, J. X. Lu, D. Y. F. Fan *et al.*. Active SBS mirror applied to ICF driver. *SPIE*, 1995, **2633**: 554~ 563
- 6 M. D. Skeldon, A. Iokishel, A. Babushkin. Transient stimulated Brillouin scattering pulse compression for photoconductive switch activation. *SPIE*, 1995, **2633**: 423~ 430

Temporal Characteristics of Brillouin Back-scattering Pulses from a Cell with Focus Geometry

Han Yong Tan Jichun

(Department of Applied Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Ding Lei Jing Feng Zhang Xiaoming

(LLF, P. O. Box 525-80, Chengdu 610003)

Abstract The temporal characteristics of Brillouin back-scattering pulses from a single cell with focus geometry were investigated experimentally. The temporal variation of the phase conjugation fidelity and the shaping pulse with high contrast using two cells were also observed. The results show that the profile of the reflected pulse is closely related to pump energy and focal length of the lens. The pulse start-point is not stable and the variation is about 1.5 ns. The pulse-shaping using a multi-cell scheme is practicable in principle.

Key words stimulated Brillouin scattering, phase conjugation fidelity, pulse-shaping for laser fusion

钛宝石激光器泵浦 Yb·YAG 晶体获得 1.053 μm 高效激光输出

Yb·YAG 晶体由于低的量子缺陷、小的热负荷、在 940 nm 处宽的吸收带、宽的反射带和优良的热力学性能参数等特点而成为掺 Yb³⁺ 激光材料中的佼佼者。尤其重要的是这种晶体可进行高浓度掺杂,因而可以加工成几百微米厚的薄片作为增益介质,对实现固体激光器的小型化、致密化和结构紧凑将是十分有利的。

我们用提拉法沿 (111) 方向生长了 Yb³⁺ 掺杂浓度为 20 at-% 的 Yb·YAG 晶体,经 1600℃ 氧气氛退火后,获得了低位错密度、低散射损耗的高质量晶体。在激光实验中,用钛宝石激光器作为泵浦源,940 nm 的泵浦光经过一个焦距为 40 mm 的透镜和腔镜,聚焦在 6 mm×6 mm×0.5 mm 的 20 at-% Yb·YAG 晶体微片上,谐振腔为平-平腔结构,输出耦合镜的 $T_{1.053} = 4.28\%$,腔镜紧贴晶体并固定在热沉板上。腔镜的一面镀 940 nm 增透膜,另一面镀 940 nm 增透膜和 1.053 μm 高反膜。晶体的输入面镀 1.053 μm 和 940 nm 增透膜,另一面镀 1.053 μm 和 940 nm 高反膜。这一设计的优点在于冷却效率高;晶体微片中的热梯度很小,有利于减小热透镜效应和热致应力双折射效应,从而实现高效、高功率激光输出。当晶体吸收的泵浦功率为 784 mW 时,得到 356 mW 1.053 μm 连续激光输出,斜率效率为 69%。

下一步,我们将采用 0.3 mm 的样品以达到更好的输出耦合效果,有关工作正在进行中。此项工作得到国家自然科学基金(69578026)和国家高技术 863-416 项目资助。

中国科学院上海光机所

杨培志 邓佩珍 刘玉璞 张影华 谢兴龙 陈伟 徐军

1999-04-06 收稿