

文章编号: 1001-3806(2005)06-0623-03

种子场诱导单池 SBS 脉冲波形保真的实验研究

杨 俊, 吕志伟*, 何伟明

(哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 提出利用种子场诱导单池受激布里渊散射 (SBS) 结构获得与抽运光脉冲波形高保真的 Stokes 放大光脉冲, 分别对稳态抽运和瞬态抽运情况下 Stokes 脉冲波形在不同焦距透镜下、随种子光强的变化进行了实验研究, 得到了 90% 的脉冲波形保真度。实验结果表明, 种子场诱导的 SBS PCM 可以获得与抽运光脉冲波形保真的 Stokes 放大光脉冲, 并为其在 ICF 激光驱动系统中的潜在应用提供了依据。

关键词: 非线性光学; 脉冲波形保真; 受激布里渊散射; 注入种子

中图分类号: O437.2 **文献标识码:** A

Experimental research of pulse-shape fidelity in seeded single-cell SBS generator

YANG Jun, LÜ Zhiwei, HE Weiming

(Institute of Optoelectronics Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract A seeded single-cell SBS generator is suggested to achieve high pulse-shape fidelity of SBS to that of the pump. Dependences of SBS pulse shapes on Stokes seed intensity pumped by static field and transient field are experimentally investigated. Pulse-shape fidelity of 90% is obtained. Experimental results show that output Stokes pulses from this SBS geometry are of high pulse-shape fidelity to the pump, which provides the foundation for its further potential application to ICF driver.

Key words nonlinear optics; pulse-shape fidelity; stimulated Brillouin scattering; seed injection

引 言

受激布里渊散射相位共轭镜 (SBS PCM) 技术能提高激光器光束质量、降低对大口径光学材料和元件加工精度的要求, 从而大幅降低系统投资, 因而其在新一代惯性约束核聚变 (ICF) 高功率激光驱动器总体方案设计中受到特别重视^[1, 2]。应用于 ICF 激光驱动器的 SBS PCM 须确保 SBS 脉冲形状与抽运脉冲形状一致, 至少两者之间要有稳定的关系^[3, 4]。这一点的实现有一定难度: 一方面, SBS 的阈值效应会改变脉冲前沿; 另一方面, SBS 的放大对抽运脉冲后沿抽空, 使整个脉冲压缩^[5-7]。普通结构的 SBS PCM 的共轭声子模是从噪声中发展起来的, SBS 阈值较高, 脉冲压缩效应显著。在 SBS 产生池中引入 Stokes 种子光信号光, 在种子场诱导下产生 SBS, 这可以降低 SBS 阈值, 并最大限度地降低 SBS 脉冲波形的变化。

对提出的“种子场诱导的 SBS”实现脉冲波形保真

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60278033, 10476009)

作者简介: 杨 俊 (1977), 女, 博士研究生, 现主要从事非线性光学的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhiveik@yeah.net

收稿日期: 2004-09-16 收到修改稿日期: 2004-11-10

进行了实验研究, 分别研究了稳态抽运和瞬态抽运的种子场诱导 SBS 脉冲波形在不同聚焦透镜下随种子光强的变化规律, 得到高达 90% 以上的脉冲波形保真度。

1 实验研究

SBS 效应是入射光波场与介质内的声波场相互作用产生的一种受激光散射现象, 当声子寿命与抽运脉冲宽度相比要小很多时, SBS 过程随时间变化不大, 这样可以近似认为抽运场、Stokes 场和声子场的振幅是不随时间变化的, 这种情况称为稳态理论; 当声子寿命与抽运脉冲宽度具有大约相当的数量级, 则不能忽略光场振幅的时间变化, 这种情况下的理论研究称为 SBS 瞬态理论。一般情况下, 瞬态和稳态的 SBS 特性不尽相同。实验分别对稳态抽运和瞬态抽运进行研究。实验中主要用 Stokes 脉宽衡量脉冲波形, 但为了方便研究, 定义一个脉冲波形保真度, 其为峰值归一化的 Stokes 光脉冲和抽运光脉冲的能量比。

1.1 稳态抽运实验研究

实验装置如图 1 所示。Nd:YAG 激光器输出近高斯型调 Q 单纵模线偏振脉冲激光, 输出波长 $\lambda_0 = 1.06\mu\text{m}$, 脉宽为 12ns~13ns 以 1Hz 运行。图中所有

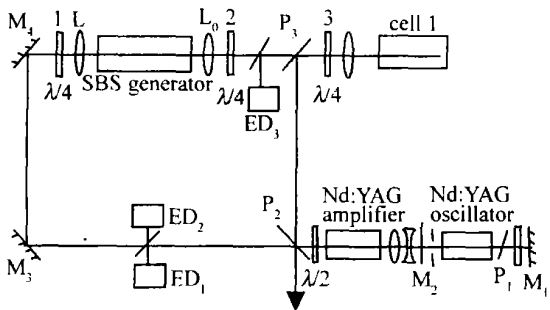


Fig 1 Experimental arrangement for static pump field

SBS池中的介质都是 CCl₄, 其声子寿命 0.6 ns 。SBS 产生池长 50 cm 。Nd:YAG 放大器出射的光经过一个 $\lambda/2$ 波片入射到偏振片 P_2 。 $\lambda/2$ 波片的作用是调整种子光与入射抽运光束的能量比, 它的光轴相对电场的振动方向转过一个小角度, 这样从它出射椭圆偏振的光, 调节光轴与电场振动方向的夹角就可以调节椭圆偏振光 x 和 y 分量的能量比。此光经过 P_2 透射和反射分别作为抽运光和用以产生 Stokes 种子光: 透射的 p 光被 M_3, M_4 反射后经过 $\lambda/4$ 波片 1, 变成圆偏振的光, 最后被透镜 L 聚焦进入 SBS 产生池; s 光被偏振片 P_3 反射进入一个 SBS 振荡池, 产生 Stokes 种子光, Stokes 种子光再次通过 $\lambda/4$ 波片 3 后也变成 p 偏振光, 从 P_3 透射, 然后经 $\lambda/4$ 波片 2 变为圆偏振, 最后被透镜 L_0 聚焦进入 SBS 产生池。 L_0 在这里主要是要保证相互作用时抽运光场包含在 Stokes 种子光场内, 以确保 SBS 是从种子场中产生的。产生的 SBS 与抽运光反向, 从 $\lambda/4$ 波片 1 出射, 偏振态变为 s 经全反镜反射, 从 P_2 侧向输出。实验中种子光的产生需要一定时间, 所以对抽运光要作适当的延时, 以使抽运光和 Stokes 种子光能够在池中相遇并有足够的长度进行相互作用。入射的抽运光和产生的 Stokes 光能量分别用能量计 ED_1 ($ED200$) 和 ED_2 ($ED200$) 探测, 入射的 Stokes 种子光用 ED_3 ($ED200$) 探测。快响应 PN 光二极管探测脉冲波形, 并用数字示波器 TDS380A 记录。

实验研究了不同焦距下种子光功率密度对 SBS 脉冲波形的影响。透镜 L 焦距分别取 5 cm 和 10 cm , 通过不同的衰减片改变入射进入池子中的种子光能量。实验中测得抽运光的能量为 56.05 mJ , Stokes 种子光的能量从 1.19 mJ 变化到 $2.7 \times 10^{-5}\text{ mJ}$ 再由测得的光斑尺寸, 根据高斯光束聚焦特性计算出抽运光和种子光的功率密度。图 2 是焦距为 5 cm 时记录的脉冲波形 (实验中为了保护探头, 对出射的光作了不同程度

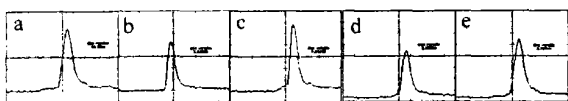


Fig 2 $f=5\text{ cm}$ dependence of SBS pulse shapes on Stokes seed intensity a—pump b—SBS without seed c— $1.0 \times 10^{-11}\text{ MW/cm}^2$ d— $2.0 \times 10^{-8}\text{ MW/cm}^2$ e— $1.6 \times 10^{-4}\text{ MW/cm}^2$

的衰减, 因此脉冲波形的高度意义不大), 其中图 2a 是无种子光、从噪声场生长的 SBS 脉冲波形, 图 2b~图 2d 是 SBS 脉冲波形随种子场的变化。可以看出, 自发 SBS 脉冲被压缩、脉冲前沿很陡; 种子场的引入减弱了脉冲压缩效应, 并且随着种子场的增强, 脉冲前沿变缓, 脉宽增宽。图 3 是不同 L 时, 实验测得的 SBS 脉冲

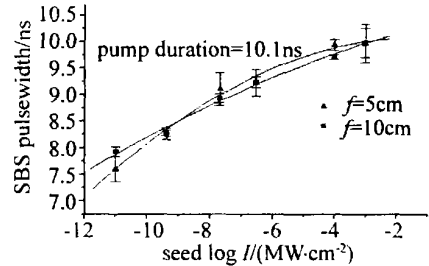


Fig 3 Dependence of SBS pulse width on Stokes seed intensity with different focal length

宽度随 Stokes 种子光的变化, 其中三角点和方点分别对应着 $f=5\text{ cm}$ 和 $f=10\text{ cm}$ 的实验点, 曲线是拟合的变化规律。从图中可以看出: 在实验考察的种子光范围内, 焦距对 SBS 脉冲宽度的影响不大, SBS 脉冲宽度随着种子光功率密度的变化趋势相同, 都随着种子光功率密度变大而变宽。这是由于种子光降低了 SBS 的阈值, 使得 Stokes 脉冲得到抽运光抽运能量而放大这个过程从抽运光的前沿就开始, 这就减弱了脉冲压缩效应; 同时在放大的过程中, Stokes 脉冲跟随抽运脉冲的波形, 得以保真。图中可以计算出, 保真度最高可达约 94%。

1.2 瞬态抽运实验研究

实验装置如图 4 所示。Nd:YAG 激光器的结构与

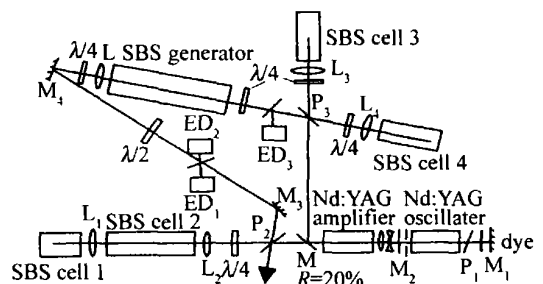


Fig 4 Experimental arrangement for transient pump field

稳态抽运实验装置中的相同, 因为要研究瞬态抽运种子光诱导的 SBS 需要脉冲宽度可与 SBS 介质的声子寿命相比的抽运光以及 Stokes 种子光, 所以必须对 Nd:YAG 放大级输出进行压缩, 这里仍利用 SBS 来压缩脉冲。所有 SBS 池中的介质都是 CCl₄, 声子寿命 0.6 ns 。Nd:YAG 放大级的输出光经过反射率 20% 的反射镜 M 分为两束, 分别用来产生抽运光和 Stokes 种子光: 从 M 透射的光经过偏振片 P_2 和一个 $\lambda/4$ 波片进入双池 SBS 脉冲压缩系统, 压缩后的 Stokes 光反向经过 $\lambda/4$ 波片变成与入射光垂直偏振的光, 被 P_2 反

射,再经全反镜 M_3 反射后通过一个 $\lambda/2$ 波片变成 p 偏振的光,此光即作为抽运光;而被 M 反射的光进入两个单池 SBS 系统,最后从偏振片 P_3 透射作为 Stokes 种子光,偏振态与抽运光相同。抽运光透过 $\lambda/4$ 波片经透镜 L 聚焦进入池子,Stokes 种子光也透过 $\lambda/4$ 波片与抽运光反向进入池子。产生的 SBS 与抽运光反向,从 P_2 出射。抽运光和 Stokes 种子光在 SBS 产生池中的对准非常重要,实验中要保证池中抽运光到达焦点时 Stokes 种子光也到达焦点处。入射的抽运光和产生的 Stokes 光能量分别用能量计 ED_1 (ED200) 和 ED_2 (ED200) 探测,入射的 Stokes 种子光用 ED_3 (ED200) 探测。强流管探测脉冲波形,并用数字示波器 TDS684A 记录。

同样研究了不同焦距时 SBS 脉冲波形随种子光强度的变化。透镜 L 焦距仍然分别取 5cm 和 10cm,实验时抽运光能量为 6.2mJ 种子光的能量从 2.6mJ 变化到 6×10^{-5} mJ 计算得其功率密度近似从 10^{-11} MW/cm² 增加到 10^{-6} MW/cm²。

与稳态抽运相似,图 5 是焦距为 5cm 时记录的噪声场生长的 SBS 脉冲波形以及种子场诱导的 SBS 随种子光的变化,从图中可以得到与稳态抽运相似的规律,脉冲宽度随种子光的增强而增宽。

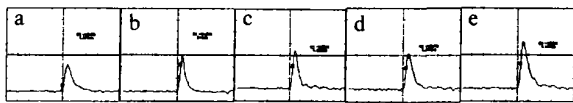


Fig 5 $f=5$ cm dependence of pulse shapes on Stokes seed intensity a—pump b—SBS without seed c— 1.0×10^{-11} MW/cm² d— 1.0×10^{-9} MW/cm² e— 1.0×10^{-7} MW/cm²

图 6 是实验测得的不同焦距下 SBS 脉冲宽度随 Stokes 种子光功率密度的变化。其中三角点和方点分

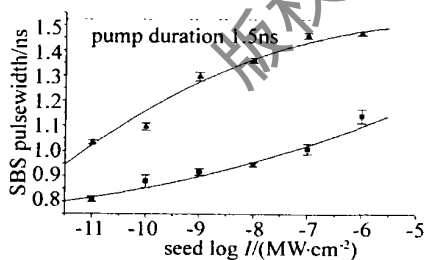


Fig 6 Dependence of SBS pulse width on seed intensity with different focal length

别对应着 $f=5$ cm 和 $f=10$ cm 所测得的实验点,而曲线是拟合的变化规律。实验中,抽运脉冲宽度的平均值大约为 1.5 ns。从图中可以看出:随着种子光功率密度的增加,短焦距和长焦距的 SBS 脉冲宽度都增宽;但是短焦距的脉宽比长焦距时宽,并且趋近于抽运脉宽。实验中也发现,随着种子光功率密度的增加,SBS 阈值降低,SBS 起始点提前,这又导致了脉冲波形的不稳定。这里计算曲线中最佳的脉冲波形保真度,焦距为 5cm 时约为 92%,焦距为 10cm 时约为 73%。与稳态抽运相比较,瞬态抽运的 SBS 脉冲波形受焦距的影响要大一些,短焦距能得到更高的脉冲波形保真度。

2 结 论

对提出的“种子场诱导的 SBS”实现脉冲波形保真进行了实验研究,主要研究了稳态抽运和瞬态抽运的种子场诱导 SBS 脉冲波形在不同聚焦透镜下随种子光强的变化,得出了如下规律:透镜对稳态抽运 SBS 脉冲波形影响较小,而对瞬态抽运影响显著,瞬态抽运下,短焦距更能实现脉冲波形保真;随着种子光的增强,Stokes 脉冲能量提高,脉冲波形的保真度增加,实验中脉冲波形保真度最高可达 90% 以上,但是太强的种子光会增加波形的不稳定性。

参 考 文 献

- [1] 张 华, 范滇元. 受激布里渊散射在 ICF 激光驱动器中的应用 [J]. 激光杂志, 2000, 21(2): 7~9.
- [2] 丁迎春, 吕志伟, 何伟明. 布里渊放大研究的进展 [J]. 激光技术, 2002, 26(4): 314~317.
- [3] FAN D Y, WEN G J, LU J X. Four-pass laser amplifier with active SBS mirror for application to ICF driver [J]. Proc SPIE, 1995, 2633: 29~35.
- [4] WEN G J, LU J X, FAN D Y. Active SBS mirror applied to ICF driver [J]. Proc SPIE, 1995, 2633: 554~564.
- [5] PALASHOV O V, KHAZANOV E A, ANDREEV N F. Nd:YAG laser with a stimulated Brillouin scattering mirror and variable pulse duration [J]. Opt Engng, 2000, 39(6): 1536~1542.
- [6] SCHMANN S, UBACHS W, HOGERVORST W. Efficient temporal compression of coherent nanosecond pulses in a compact SBS generator amplifier setup [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(3): 358~366.
- [7] 哈斯乌力吉, 吕志伟, 何伟明. 受激布里渊散射中的液体介质 [J]. 激光技术, 2003, 27(3): 216~219.
- [8] SPE, 1999, 3898: 132~138.
- [9] AGNESIA, DELL'ACQUA S, GUANDALINI A *et al*. Optical spectroscopy and diode-pumped laser performance of Nd³⁺ in the CNGG crystal [J]. IEEE J Q E, 2001, 37(2): 304~313.
- [10] VOROM'KO Y K, GESSON S B, ESKOV N A *et al*. Spectroscopic and lasing properties of calcium niobium gallium garnet activated with Cr³⁺ and Nd³⁺ [J]. Soviet J Q E, 1988, 18(2): 198~201.
- [11] 兰建明, 陈建中, 郭云飞 *et al*. Yb:YVO₄ 晶体的生长及光谱性能研究 [J]. 人工晶体学报, 2003, 32(1): 44~49.

(上接第 600 页)

参 考 文 献

- [1] SHIMAMURA K, TMOSECHKIN M, SASAKI T *et al*. Growth and characterization of calcium niobium gallium garnet (CNGG) single crystals for laser applications [J]. Crystal Growth, 1993, 128(1~4): 1021~1024.
- [2] MALLIK A, AGRAWAL L. Compact high-power diode array pumped Nd:CNGG laser employing cusp geometry optical coupling [J]. Proc