

文章编号: 0258-7025(2005)02-0196-04

布里渊放大修正陡前沿 Stokes 脉冲波形

杨 珺, 何伟明, 张 锐, 吕志伟

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 研究了受激布里渊散射(SBS)放大池中,通过改变抽运光与 Stokes 种子光脉冲的延时,改变它们在池中的相遇位置,实现抽运光对陡前沿种子光脉冲不同部位的选择性放大,从而修正 Stokes 脉冲波形。理论和实验研究了 Stokes 光脉宽、脉冲波形前后沿时长比以及能量提取效率等参数随相遇时间的变化规律,在相遇时间 2.5 ns 时,理论得到前后沿时长比为 1,能量提取效率 80% 以上的 Stokes 放大光脉冲波形,理论和实验符合较好。

关键词 光电子学;脉冲修正;布里渊放大;相遇时间

中图分类号 O 437 **文献标识码** A

Shape Modification of Stokes Pulses with Steep Leading Edge by Brillouin Amplification

YANG Jun, HE Wei-ming, ZHANG Rui, LÜ Zhi-wei

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Brillouin amplification of Stokes seed pulses with steep leading edge is investigated. Various parts of Stokes seed pulse can be selectively amplified by changing the delay time between pump and Stokes seed pulse entering the cell, and Stokes pulse shape can be modified. Dependences of output Stokes pulse duration, the temporal ratio of leading edge to trailing edge β , and the energy extraction efficiency η on the encounter time are theoretically and experimentally researched. Output Stokes pulse with $\beta = 1$ and $\eta > 80\%$ is theoretically achieved at encounter time of 2.5 ns. Theoretical simulations fit with the experimental results.

Key words optoelectronics; pulse shape modification; Brillouin amplification; encounter time

1 引 言

受激布里渊散射(SBS)相位共轭镜具有实时修正高功率激光系统任意波前畸变的独特能力,从而大大提高激光器光束质量;并且其结构简单,可以降低高功率激光系统对大口径光学材料和元件加工精度的要求,因此在惯性约束核聚变(ICF)激光驱动器发展中具有重要意义^[1,2]。惯性约束核聚变激光驱动器特殊的运行方式要求受激布里渊散射脉冲形状与抽运光脉冲形状一致^[3,4],但是受激布里渊散射产生的阈值效应以及增益饱和时的非线性放大会议 Stokes 脉冲前沿变陡并使整个脉冲压缩,因此一般受激布里渊散射产生池中出射的 Stokes 光前沿

和后沿不对称。

在池长和脉宽合适的情况下,通过改变抽运光与 Stokes 种子光在放大池中的相遇位置,可以实现抽运光对畸变 Stokes 脉冲不同部位的放大,从而对 Stokes 脉冲波形进行修正^[5,6]。通过选取合适的条件,理论计算和实验结果都得到了对称的 Stokes 脉冲波形。

2 理论模型

受激布里渊放大的物理模型如图 1 所示。Stokes 种子光与抽运光脉冲分别从 $z = 0$ 和 $z = L$ 处入射到放大池,Stokes 脉冲提取抽运光能量并在

收稿日期:2003-09-04;收到修改稿日期:2003-11-10

基金项目:国家自然科学基金(60088001)和国家 863 计划 804 主题资助项目。

作者简介:杨 珺(1977—),女,哈尔滨工业大学博士研究生,主要从事非线性光学方面的研究。E-mail:june1121@sohu.com

$z = L$ 处出射。池中两束入射光在受激布里渊散射阈值以下相互干涉, 由电致伸缩力产生空间调制光栅, 因为两束光具有适当的频率失调, 两束光的相互作用和滞后于干涉模式的移动光栅将导致单向的抽运光能量向 Stokes 种子光能量的转移, 而抽运光与种子光在池中不同位置相遇, 种子光经历的放大过程不同, 从而输出光波形也不同。

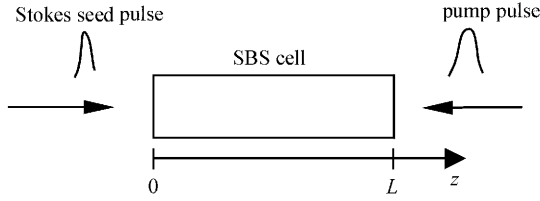


图 1 受激布里渊散射放大的物理模型

Fig. 1 Physical model of Brillouin amplifier

从麦克斯韦(Maxwell)波动方程以及介质的能量运输方程出发, 略去频率为零及频率为二倍光场的项(它们对布里渊共振激发不起作用), 并利用慢变振幅近似得到受激布里渊散射过程的耦合波方程组^[7]

$$\frac{\partial E_L}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial E_L}{\partial t} = -ig_L \rho E_S + \frac{\alpha}{2} E_L, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial E_S}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_S}{\partial t} = ig_S \rho^* E_L - \frac{\alpha}{2} E_S, \quad (1b)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Gamma \rho = ig_a E_L E_S^*, \quad (1c)$$

其中 E_L, E_S 和 ρ 分别为抽运光, Stokes 光和声波场振幅。 $g_L \approx g_S = \frac{\gamma \omega}{4cn\rho_0}$ 和 $g_a = \frac{\gamma q^2}{16\pi\Omega}$ 代表受激布里渊散射的声光耦合系数, γ 为介质的电致伸缩系数, ρ_0 为介质的未扰密度, α 为吸收系数, $\Gamma = \Gamma' q^2$ 为声子强度衰减速率, Γ' 为衰减参数。

对式(1c)进行积分并代入式(1a)和(1b), 采用时间隐式有限差分、空间后向差分以及辛普森(Simpson's)梯形公式离散化上述方程组可得

$$G_{Sj} E_{Lj}^{m+1} + G_j E_{Sj}^{m+1} - E_{Lj+1}^{m+1} = r_B E_{Lj}^m, \quad (2a)$$

$$-G_{Lj} E_{Sj}^{m+1} - G_j E_{Lj}^{m+1} + E_{Sj+1}^{m+1} = r_B E_{Sj}^m, \quad (2b)$$

式中上角标 m 代表时间 $t = m\Delta t$, 下角标 j 代表空间点 $z = j\Delta z$, $r_B = \frac{n\Delta z}{c\Delta t}$, $G_j = G'_j P_j^m$, $G_{Lj} = 1 - r_B +$

$G'_j |E_{Lj}^m|^2 - \frac{1}{2} \alpha \Delta z$, $G_{Sj} = 1 + r_B + G'_j |E_{Sj}^m|^2 +$

$\frac{1}{2} \alpha \Delta z$, 其中 $G'_j = \frac{g\Gamma\Delta t\Delta z}{4}$, $g = \frac{2g_L g_a}{\Gamma} \approx \frac{2g_S g_a}{\Gamma}$, P_j^m

表示声子场的建立

$$P_j^m = (P_j^{m-1} + 2E_{Lj}^m E_{Sj}^m) e^{(-\Gamma\Delta t)}, \quad (3a)$$

$$P_j^0 = E_L^0 E_S^0 e^{(-\Gamma\Delta t)}, \quad (3b)$$

光强 $I_{L,S} = |E_{L,S}|^2$, 加上边界条件: $E_{S0}(z=0, t) = E_{S0}$ 和 $E_{Lj}(z=L, t) = E_{Lj}(t)$, 对其编程求解。

3 数值模拟

将入射到放大池中的 Stokes 光和提取抽运光能量后从放大池出射的 Stokes 光分别称作 Stokes 种子光和出射光。定义相遇时间 T 为: 抽运光峰值与 Stokes 种子光峰值相遇时, 其相遇点与放大池的抽运光入射端面的距离所对应的时间, 相遇点在抽运光入射端面上时为零, 在该端面抽运光入射一侧时为正, 另一侧则为负。能量提取效率 η 定义为 Stokes 出射光能量与 Stokes 种子光能量之差与抽运光能量的比值。前后沿时长比 β 为 Stokes 脉冲处在峰值光强 10%~90% 之间的前沿时长与后沿时长之比。

数值计算时的参数选择如下: 受激布里渊放大池中介质的折射率为 1.5, 稳态功率增益取 6 cm/

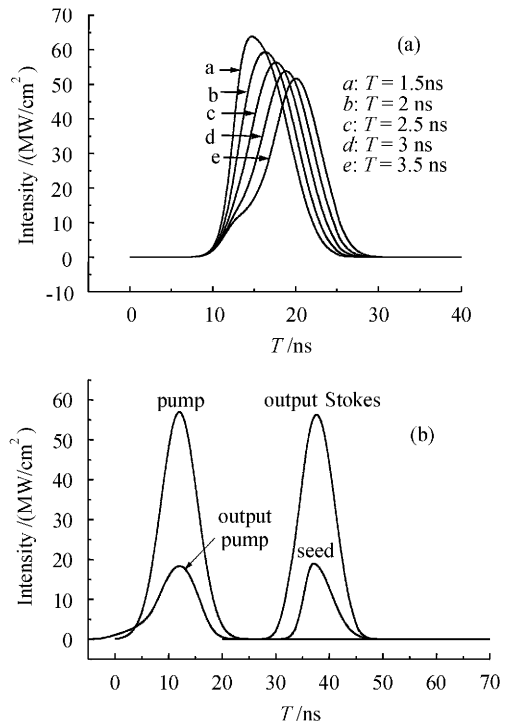


图 2 (a) Stokes 脉冲输出波形随相遇时间的变化; (b) $T = 2.5$ ns 时抽运光, 种子光, Stokes 出射光和透射抽运光的脉冲形状

Fig. 2 (a) Dependence of output Stokes pulse shapes on encounter time; (b) Pump pulse shapes of Stokes seed, output Stokes, and output pump when $T = 2.5$ ns

GW,介质的吸收系数取 $4.65 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$,介质声子寿命为 1 ns;入射的激光脉冲波长为 $1.06 \mu\text{m}$,抽运光能量 240 mJ,脉宽 8 ns;为了模拟陡前沿种子光,设其为前后沿分别是 4 ns 和 8 ns 并符合高斯分布的脉冲,能量为 30 mJ。计算所得的脉冲形状如图 2 所示。

通过对种子光后沿有选择地放大,使脉冲峰后移,从而使 Stokes 种子光的前沿增宽,以达到对脉冲形状的重新整形,这就需要抽运光相对于种子光应该有适当的延时,相遇时间随延时变化,抽运光峰值在池中就与种子光的不同部位相遇。图 2(a)是池长为 60 cm 时 Stokes 输出脉冲形状随相遇时间的变化。当相遇时间从 1.5 ns 变化到 3.5 ns 时,种子光被放大的区域逐渐从峰值附近变化到脉冲后沿。图 2(b)是池长 60 cm,相遇时间 2.5 ns 时,抽运光,种子光,Stokes 出射光和透射抽运光的脉冲形状。由图可知,抽运光对种子光中部及后部的明显放大使得输出 Stokes 光相比种子光在能量被放大的同时,脉冲恢复到前后沿对称,与原有抽运光脉冲形状相似,从而起到了脉冲整形的作用。

图 3 是池长 60 cm 时 Stokes 脉冲前后沿时长比、脉宽以及能量提取效率随相遇时间 T 的变化。由图可以看出,相遇时间在 1~4 ns 的范围内增大时,Stokes 脉冲前后沿时长比增大,脉宽先增大后

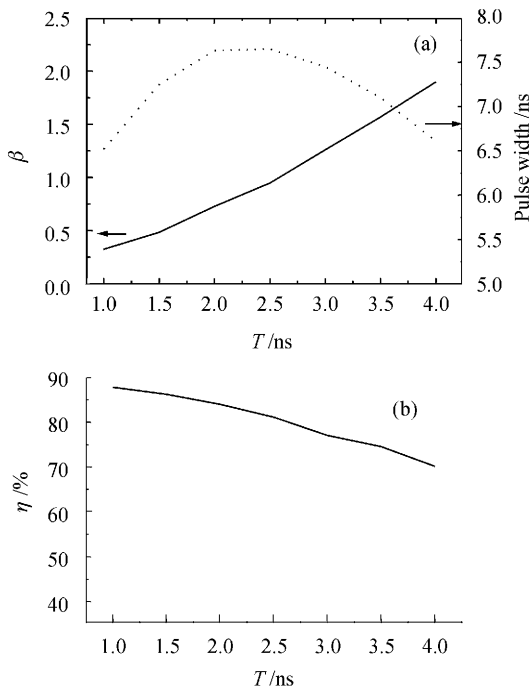


图 3 Stokes 输出光参数随相遇时间 T 的变化
Fig. 3 Dependence of output parameters on encounter time T

减小,能量提取效率降低。这是因为随着相遇时间的增大,抽运光由种子光对中部和前沿的放大逐渐转为后沿的放大,引起前后沿时长比增大,其中会有一个前后沿比为 1 的最佳点。脉宽随着相遇时间的增加,也会先增大后减小。而对于提取效率,当种子光与抽运光峰值在池中相遇时,耦合最强,能量提取效率最高。

4 实验研究

4.1 实验装置

实验光路如图 4 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,波长 $\lambda_0 = 1.06 \mu\text{m}$,脉宽约为 8 ns,以 1 Hz 运行。Nd:YAG 放大器输出光经过 $1/2$ 波片后被偏振分束器 P_2 分为两束:透射的 P 偏振光被 L_3 和 L_4 缩束后作为抽运光被耦合进入放大池;被 P_2 反射的 S 偏振波经 $1/4$ 波片变成圆偏振光后聚焦进入种子产生池产生后向 Stokes 种子光,其再次通过 $1/4$ 波片成为 P 偏振光,并经过 P_2 透射后由 M_3 及小孔光阑耦合进入放大池。调节 $1/2$ 波片的转角可以调整种子光与入射抽运光的能量比。调节 L_3 和 L_4 的间距,使得抽运光进入放大池后光斑直径比通过小孔的种子光直径稍大,确保种子光得到充分放大。通过调整产生池的位置可以调整 Stokes 种子光和抽运光在布里渊放大池中的相遇位置。

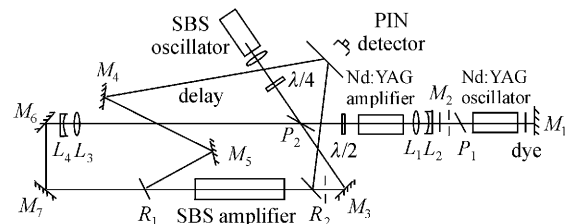


图 4 实验装置图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

在放大池中,分光片 R_1 (31%) 提取出部分 Stokes 输出光,并经由全反镜 M_4 和 M_5 延时后与由分光片 R_2 (22%) 提取的 Stokes 种子光都打在纸屏的同一部位,由快响应 PIN 光二极管探测波形,并由数字示波器 TDS684A 记录。种子光、抽运光以及 Stokes 输出光的能量都用能量计 ED200 探测。受激布里渊散射产生池长为 20 cm,布里渊放大池长 40 cm。产生池和放大池的介质都为 CCl_4 ,介质的声子寿命为 0.6 ns,折射率为 1.46。

4.2 实验结果及分析

为了便于对比布里渊放大对种子光脉冲的改变程度,采用对 Stokes 脉冲延时的方法,将 Stokes 种

子光和输出光用示波器一个通道采集。图 5 是记录的脉冲波形,脉宽随相遇时间 T 的变化规律由图 6 给出。

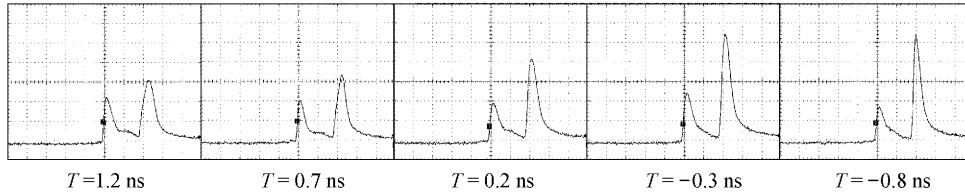


图 5 Stokes 脉冲波形随相遇时间 T 的变化

每个图中左边的脉冲为 Stokes 种子光,右边的脉冲为 Stokes 输出光

Fig. 5 Dependence of Stokes pulse shape on encounter time T

Each left pulse denotes Stokes seed and right pulse denotes output Stokes

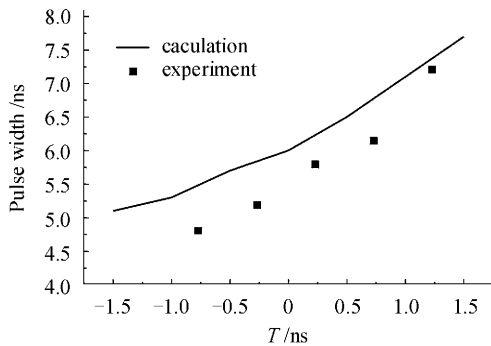


图 6 Stokes 输出脉宽随相遇时间 T 的变化

Fig. 6 Dependence of output pulsewidth on encounter time T

从图 5 可以看出,当相遇时间较大(1.2 ns)时,抽运光相对于种子光的延时较长,抽运光的峰值在放大池中只能与种子光的中后部相遇,这样种子光的后沿得到显著放大,使得 Stokes 出射光前沿较种子光变缓,脉宽变宽,脉冲波形前后沿趋于对称。当相遇时间逐渐减小,抽运光与种子光的延时逐渐变小,池中抽运光峰值与种子光相遇的位置逐渐从后沿变到前沿,Stokes 种子光前沿抽空抽运光能量,前沿被进一步放大,变得更陡,Stokes 输出光脉宽逐渐变窄。图 6 中实线是相同实验条件下理论计算所得的 Stokes 输出光脉宽随相遇时间的变化规律,其变化趋势与实验点一致。

5 结 论

从理论和实验上研究了利用受激布里渊放

大对陡前沿 Stokes 脉冲波形的修正,得到了 Stokes 输出脉宽随相遇时间的变化规律,在 $T = 2.5$ ns 时,理论得到了前后沿时长比为 1 的 Stokes 脉冲波形,实验与理论符合较好。从研究中可以看出,相遇时间是影响输出波形的重要因素,为了修正陡前沿必须选择适当的相遇时间,即抽运光相对于种子光适当延时,它们的峰值在放大池外相遇,使 Stokes 种子光的后沿得到显著放大。

参 考 文 献

- 1 Youlun Ju, Qi Wang, Deying Chen *et al.*. Compensating laser wave-front aberration in atmosphere 1.27 km away with SBS [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, 1(12):683~685
- 2 S. Schiemann, W. Ubachs, W. Hogervorst. Efficient temporal compression of coherent nanosecond pulses in a compact SBS generator-amplifier setup [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, 33(3):358~366
- 3 Fan Dianyuan, Wen Guojun, Lu Junxiao. Four-pass laser amplifier with active SBS mirror for application to ICF driver [C]. *SPIE*, 1995, 2633:29~35
- 4 G. J. Wen, J. X. Lu, D. Y. Fan *et al.*. Active SBS mirror applied to ICF driver [C]. *SPIE*, 1995, 2633:554~564
- 5 Ding Yingchun, Lü Zhiwei, He Weiming. Influence of angle between seed and pump beam on Brillouin amplification [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, A29(6):530~532
丁迎春,吕志伟,何伟明. 种子光与抽运光交角对布里渊放大的影响[J]. *中国激光*, 2002, A29(6):530~532
- 6 Ding Yingchun, Lü Zhiwei, He Weiming. Influence of encounter time on Brillouin amplification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(7):784~788
丁迎春,吕志伟,何伟明. 相遇时间对布里渊放大的影响[J]. *光学学报*, 2002, 22(7):784~788
- 7 R. Chu, M. Kanefsky, J. Falk. Transient phase conjugation by stimulated Brillouin scattering: numerical analysis of zero-order solutions [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, 11(2):331~338