

# 种子场对单池受激布里渊散射脉冲波形保真的影响\*

何伟明 杨 † 吕月兰 吕志伟

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150001)

(2003 年 3 月 26 日收到, 2003 年 4 月 28 日收到修改稿)

受激布里渊散射(SBS)产生池中引入种子光场,在种子场诱导下产生SBS,这不但可以降低SBS阈值,更可以获得最小的SBS脉冲形变,确保与抽运光波形基本一致,获得高波形保真.从理论和实验两方面研究了种子光强弱对脉冲波形保真的影响.

关键词:受激布里渊散射,脉冲波形保真,注入种子

PACC:4265C,4265F

## 1. 引言

惯性约束核聚变(ICF)是目前研究获得可控核聚变的重要途径之一.受激布里渊散射(SBS)相位共轭镜具有对高功率激光系统进行实时相位共轭修正任意波前畸变的能力,可以大大提高激光驱动器总体性能水平,并大幅降低系统投资,因此在ICF驱动器发展中具有重要意义.针对ICF激光驱动器特殊的运行方式,要将SBS应用其中,SBS相位共轭镜必须满足以下要求<sup>[1,2]</sup>:

1)承受适当的抽运光强度.在SBS池中,不发生损伤、击穿以及除SBS以外的其他非线性现象.

2)能量转换效率大于80%.

3)相位保真度大于80%.

4)时间抖动:为保持驱动器众多路激光的功率平衡,产生斯托克斯(Stokes)波的时间抖动应小于20ps.

5)适于脉冲整形:确保脉冲波形与抽运光波形一致.至少两者有稳定的相关性.

6)运转稳定性:上述参数的随机抖动要小于5%,最多10%.

这些要求是相当苛刻的,但在理论和技术上也不是不可能的.许多理论和实验研究都证实1)到4)是可以实现的<sup>[3-8]</sup>.5)要求SBS脉冲波形和抽运光

脉冲波形一致,这一点有一定的难度,一方面,产生SBS存在阈值效应,会改变脉冲前沿;另一方面,SBS的前沿得到优先放大,并抽空抽运光脉冲,使整个脉冲压缩.但是,脉冲波形的保真在高功率激光器中很关键,它直接影响高功率激光器的性能.要使SBS波形失真最小的一个方法是,在SBS产生池中引入斯托克斯种子光场,它能够最大限度的降低SBS波形的变化.

本文基于5),提出了一种脉冲波形保真的SBS共轭镜方案——在种子光诱导下产生SBS,即在SBS产生池中引入种子光场,这不但可以降低SBS阈值,更可以获得最小的SBS脉冲形变.

## 2. 种子场诱导下SBS数值计算模型的建立

种子场诱导下的单池SBS的物理模型如图1所示.种子光和抽运光从池的两端入射到充满非线性介质的SBS产生池.由于Stokes种子光的存在,SBS光将优先从种子光场、而不是噪声中生长.值得注意的是,抽运光场在池中应包含在Stokes种子光场中,以确保SBS从种子场中生长.Stokes种子光由另外一个SBS产生池产生,有很好的光束质量.在我们的研究中,Stokes种子光脉冲从 $z=0$ 处入射到产生池,抽运光脉冲从 $z=L$ 处入射到产生池,Stokes种

\* 国家自然科学基金(批准号 60088001)和国防科技重点实验室基金以及 863 高技术资助的课题.

† E-mail: june1121@sohu.com

子光脉冲与抽运光脉冲在池中相互作用,在 Stokes 种子光诱导下产生 SBS,并在  $z = L$  处出射。

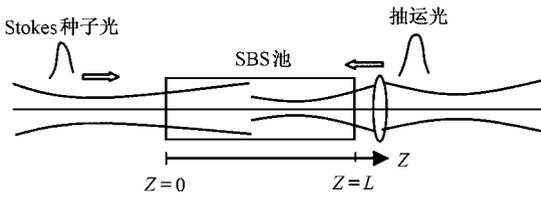


图1 种子光场诱导的SBS物理模型

由上述物理模型可以看出,受激布里渊散射是一个三波参量混频过程,两个辐射场:入射抽运光场与 Stokes 种子场,它们遵守 Maxwell 方程组,并通过介质声场的电致伸缩过程耦合,介质声场遵守 Navier-Stokes 方程。

忽略抽运光和 Stokes 光场的横向变化,它们仅仅是时间变量  $t$  和空间变量  $z$  (光传播方向)的函数。设布里渊激活介质中总光场强度为

$$\tilde{E}(z, t) = \tilde{E}_L(z, t) + \tilde{E}_S(z, t), \quad (1)$$

其中沿负  $z$  方向传播的入射抽运光场强度  $\tilde{E}_L(z, t)$  为

$$\tilde{E}_L(z, t) = \frac{1}{2} E_L(z, t) e^{-(k_L z - \omega_L t)} + \text{c.c.} \quad (2)$$

沿  $z$  向传播的 Stokes 场强度  $\tilde{E}_S(z, t)$  为

$$\tilde{E}_S(z, t) = \frac{1}{2} E_S(z, t) e^{-(k_S z - \omega_S t)} + \text{c.c.} \quad (3)$$

声波场用介质的密度偏离其平均值  $\rho_0$  的变化值  $\tilde{\rho}(z, t)$  来描述。用复振幅  $\rho(z, t)$  来表示密度的变化,有

$$\tilde{\rho}(z, t) = \frac{1}{2} \rho(z, t) e^{i(qz - \Omega t)} + \text{c.c.} \quad (4)$$

这里引入声波场的频率  $\Omega = \omega_L - \omega_S$ ; 声波的波矢  $q = k_L + k_S$ , 并且有关系式  $\Omega = qv_a$ , 其中  $v_a$  表示声波在介质中的传播速度。

以上各式中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 SBS 过程的耦合波方程组

$$\frac{\partial E_L}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial E_L}{\partial t} = -ig_L \rho E_S + \frac{\alpha}{2} E_L, \quad (5a)$$

$$\frac{\partial E_S}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_S}{\partial t} = ig_S \rho^* E_L - \frac{\alpha}{2} E_S, \quad (5b)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{2} \Gamma \rho = ig_a E_L E_S^*, \quad (5c)$$

式中  $g_L = \frac{\gamma \omega_L}{4cn\rho_0}$ ,  $g_S = \frac{\gamma \omega_S}{4cn\rho_0}$ ,  $g_a = \frac{\gamma q^2}{16\pi\Omega}$ ,  $\gamma$  是介质的电致伸缩系数,  $\rho_0$  是介质的未扰密度,  $\alpha$  是吸收系

数,  $\Gamma$  为自发辐射的布里渊线宽,  $\Gamma = 1/2\tau_p$ ,  $\tau_p$  为声子寿命。

令  $g_L \approx g_S = g_2$ ,  $g_a = g_1$ , 对(5c)式进行积分后代入(5a)(5b)式,并考虑截面的变化,得到

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_L = \frac{g\Gamma}{2\sigma} E_S \int_0^t E_S^* E_L \exp[-\Gamma(t-\tau)] d\tau + \frac{1}{2} \alpha E_L, \quad (6a)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_S = \frac{g\Gamma}{2\sigma} E_L \int_0^t E_L^* E_S \exp[-\Gamma(t-\tau)] d\tau - \frac{1}{2} \alpha E_S, \quad (6b)$$

其中  $g = 2g_1 g_2 / \Gamma$ , 功率  $P_L = |E_L|^2$ ,  $P_S = |E_S|^2$ 。边界条件为  $E_S(z=0, t) = E_{S0}$  和  $E_L(z=L, t) = E_{L1}(t)$  这样构成完整的数学模型。在空间上采用向后插商, 时间上采用隐格式有限差分, 对(6)式进行离散化和数值求解。

### 3. 种子场对 SBS 脉冲波形保真影响的数值模拟

因为以前研究波形保真的报道很少, 没有提出一个现成的衡量波形保真的标准, 这里定义一个波形保真度。首先分别对抽运光场和 Stokes 光场进行峰值归一化, 然后比较归一化后两光场的能量, 其数学公式为

$$F = \frac{\int \tilde{E}'_S(z, t) dt}{\int \tilde{E}'_L(z, t) dt} = \frac{\int \frac{\tilde{E}_S(z, t)}{|\tilde{E}_S(z)|} dt}{\int \frac{\tilde{E}_L(z, t)}{|\tilde{E}_L(z)|} dt} = \frac{|E_L(z)|}{|E_S(z)|} \cdot \frac{\int \tilde{E}_S(z, t) dt}{\int \tilde{E}_L(z, t) dt}$$

其中  $\tilde{E}'_L$  和  $\tilde{E}'_S$  分别是峰值归一化后的抽运光场和 Stokes 光场。

计算参数选取如下: SBS 产生池池长为 50cm, 池中介质的折射率为 1.5, 介质的稳态功率增益取 4cm/GW, 介质的声子寿命取 0.6ns, 介质的吸收系数取零, 入射抽运光脉冲波长为  $1\mu\text{m}$ , 脉宽取 2ns。

比较不同焦距时, 注入的种子光的强弱对输出

脉冲波形的影响. 计算参数如下: 焦距分别取 5cm, 10cm 和 15cm, 抽运光峰值功率 1MW. 图 2 是 SBS 脉冲宽度和脉冲波形保真度随种子光强弱的变化. 从图可以看出, 随着种子光的增强, 脉冲宽度逐渐变宽, 最后趋于抽运光脉宽. 相应的, 随着注入种子光的增强, 脉冲波形保真度趋近于 1. 这是因为种子光降低了 SBS 的阈值效应, SBS 从抽运脉冲前沿就可以抽运能量得到放大, 从而跟随抽运脉冲的波形, 达到良好的波形保真度. 从图中还可以看出焦距对脉冲波形的影响: 种子光强度相同时, 随着焦距的增加, 脉冲压缩效应增强, 脉冲波形保真度变小. 这是因为焦距增加使瑞利长度增长, 有效相互作用长度增加, 前沿放大增强而导致前沿变陡.

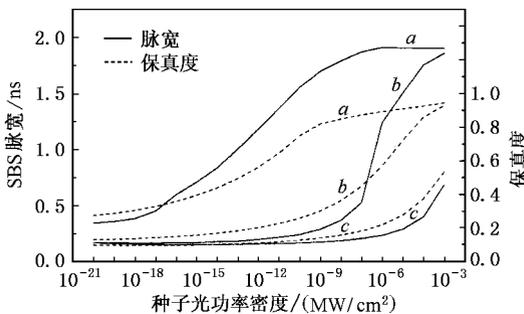


图 2 不同焦距下 SBS 脉宽和脉冲波形保真度随种子光强的变化 (曲线 a.  $f=5\text{cm}$ , 曲线 b.  $f=10\text{cm}$ , 曲线 c.  $f=15\text{cm}$ )

## 4. 种子场对 SBS 脉冲波形保真影响的实验研究

### 4.1. 实验装置

实验装置如图 3 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  $\lambda_0 = 1.06\mu\text{m}$ , 脉宽为 12—13ns, 以 1Hz 运行. 所有 SBS 池中的介质都是  $\text{CCl}_4$ , 其声子寿命 0.6ns. 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  $1/4$  波片进入双池 SBS 脉冲压缩系统, 压缩后的 Stokes 光反向经过  $1/4$  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  $1/2$  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  $1/4$  波片经透

镜  $L$  聚焦进入池子, Stokes 种子光也透过  $1/4$  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 ED1(ED200)和 ED2(ED200)探测, 入射的 Stokes 种子光用 ED3(ED200)探测. 强流管探测脉冲波形, 并用数字示波器 TDS684A 记录.

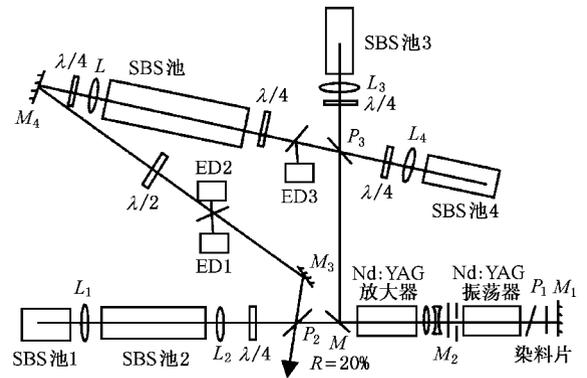


图 3 实验装置图

### 4.2. 实验结果及分析

实验研究了不同透镜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 5cm 和 10cm, 改变射入池子的 Stokes 种子光的能量. Stokes 种子光的变化是通过衰减片衰减入射进入池子的种子光能量来实现的. 实验中, 抽运光的能量为 6.2mJ, 种子光的能量从 2.6mJ 变化到  $6 \times 10^{-5}$  mJ.

图 4 是不同焦距时, 噪声场生长的 SBS (图 4 (a)) 以及在 SBS 池中引入 Stokes 种子光后, 从记录中抽取的 SBS 脉冲波形随种子光的变化 (图 4 (b)—(d)). 图中由测得的种子光的能量以及光斑尺寸计算出种子光的功率密度, 近似从  $10^{-11}$   $\text{MW}/\text{cm}^2$  增加到  $10^{-7}$   $\text{MW}/\text{cm}^2$ . 从图中可以明显看出, Stokes 种子光的引入减弱了 SBS 的脉冲压缩效应, 而使 SBS 脉冲宽度比未引入种子光场时产生的 SBS 脉冲宽度要宽. 长焦距产生的 SBS 脉冲宽度比短焦距时窄. 由于理论计算时定义的脉冲波形保真度对实验测量的计算量太大, 所以实验中主要用 SBS 脉冲宽度来衡量与抽运脉冲的保真, 但是这里仍然近似计算了 SBS 脉冲波形最好时的波形保真度. 图 4 (A) 中最佳的脉冲波形保真度约为 90%; 图 4 (B) 中最佳值约为

87% . 与未引入种子光时图 4(A)(a) 的 48% 和图 4(B)(a) 的 40% 相比较 , 可见 , 种子光的引入明显改善 了 SBS 脉冲波形 ( 图 4 只表示脉冲波形 , 而不代表 脉冲的强弱 ) .

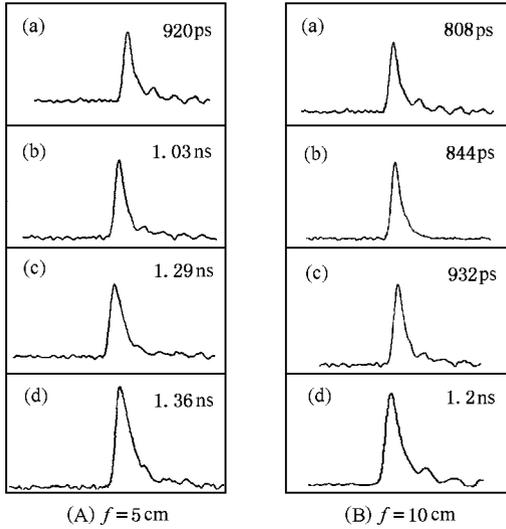


图 4 不同焦距时噪声场生长的 SBS 脉冲波形 ( a ) 以及 SBS 脉冲波形随 Stokes 种子光功率密度的变化 ( b ) — ( d ) ( 种子光功率密度 ( b )  $1.0 \times 10^{-11} \text{ MW/cm}^2$  , ( c )  $1.0 \times 10^{-9} \text{ MW/cm}^2$  , ( d )  $1.0 \times 10^{-7} \text{ MW/cm}^2$  )

图 5 是不同焦距下 SBS 脉冲宽度随 Stokes 种子光功率密度的变化 . 其中 ▲ 和 ■ 分别对应着  $f = 10\text{cm}$  和  $f = 5\text{cm}$  所测得的实验点 , 而曲线是相同条件下理论计算的结果 . 实验中 , 抽运脉冲宽度的平均值大约为  $1.5\text{ns}$  . 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 , 并且趋近于抽运光脉宽 .

还可以看出 , 理论计算和实验所得的变化趋势是相同的 ,  $f = 5\text{cm}$  时实验与理论曲线符合较好 , 实验值比理论计算稍高 , 而  $f = 10\text{cm}$  时 , 理论计算较实验测得的点要更高一些 , 这可能是因为 ,  $f = 10\text{cm}$  时 , 池中的 SBS 介质受各种非线性光学效应的影响较大 , SBS 脉冲可能会出现尖峰的情况 , 影响了实验的测量 . 这里也计算了曲线中最佳的脉冲波形保真度 , 焦距为  $5\text{cm}$  时约为  $92\%$  , 而焦距为  $10\text{cm}$  时约为  $73\%$  .

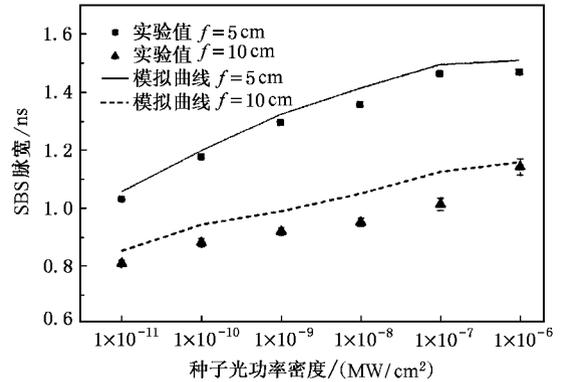


图 5 不同焦距时 SBS 脉冲宽度随种子光功率密度的变化

### 5. 结 论

以前大部分文献都是利用 SBS 效应实现脉冲压缩 , 对脉冲波形保真鲜有报道 . 本文提出 “ 种子场诱导的 SBS ” 实现脉冲波形保真 , 从理论和实验两方面研究了种子光强对脉冲波形保真的影响 , 研究表明 , 种子光越强脉冲波形的保真度越好 , 但是太强的种子光会增加波形的不稳定性 . 实验中脉冲波形保真度最高可达  $90\%$  以上 . 这些结论都对实现脉冲波形保真的方案提供了很好的指导作用 .

[ 1 ] Fan D Y , Wen G J and Lu J X 1995 *SPIE* **2633** 29  
 [ 2 ] Wen G J , Lu J X , and Fan D Y 1995 *SPIE* **2633** 554  
 [ 3 ] Dobyichin M *et al* 1991 *Sov. Quantum Electron* **20** 1053  
 [ 4 ] Okishev 1994 *CLEO '1994* **6** 161  
 [ 5 ] Crofts G J *et al* 1991 *J. Opt. Soc. Am. ( B )* **8** 2282  
 [ 6 ] Lü Z W *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1286 ( in Chinese ) [ 吕志伟

等 2002 物理学报 **51** 1286 ]  
 [ 7 ] Lü Z W *et al* 2000 *Laser Journal* **21** 10 ( in Chinese ) [ 吕志伟等 2000 激光杂志 **21** 10 ]  
 [ 8 ] Lü Z W *et al* 2000 *Chinese Journal of Lasers* **A27** 53 ( in Chinese ) [ 吕志伟等 2000 中国激光 **A 27** 53 ]

# The influences of seed on stimulated Brillouin scattering pulse shape fidelity in seeded single-cell<sup>\*</sup>

He Wei-Ming Yang Jun Lü Yue-Lan Lü Zhi-Wei

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

( Received 26 March 2003 ; revised manuscript received 28 April 2003 )

## Abstract

To seed a Stokes pulse into the stimulated Brillouin scattering (SBS) generator, the induced SBS by this seeded Stokes pulse can make the SBS threshold reduced, and the best shape fidelity can be obtained. The influences of seed power on SBS pulse-shape fidelity in a seeded single-cell are investigated in theory and experiment.

**Keywords** : stimulated Brillouin scattering , pulse shape fidelity , seed injection

**PACC** : 4265C , 4265F

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60088001 ) , Foundation of the National Defence Science and Technology Key Laboratory and the National High-tech Development program of China.