

文章编号 : 0253-2239(2002)07-0784-05

# 相遇时间对布里渊放大的影响\*

丁迎春 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: 利用瞬态包含抽运抽空的受激布里渊散射理论模型对布里渊放大器进行了数值模拟, 给出了布里渊放大中能量提取效率、斯托克斯种子光放大率、斯托克斯种子光脉宽压缩率和抽运光脉宽压缩率在几种不同的种子光和抽运光能量比下随不同相遇时间的变化规律。在实验上取了三种不同的相遇时间进行了验证, 理论与实验符合得较好。

关键词: 布里渊放大器; 能量提取效率; 相遇时间

中图分类号: O437 文献标识码: A

## 1 引 言

布里渊放大器是强激光多脉冲合成和脉宽压缩的一种有效方案, 特别适合于长脉冲的压缩。它能够承受高能量负载, 所以人们已经从很多方面对布里渊放大器进行了研究<sup>[1~6]</sup>。在布里渊放大器中, 两束光(抽运光和斯托克斯种子光)从放大池的两端入射到非线性介质, 在没有达到阈值的条件下相互干涉, 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斯托克斯种子光能量的转移。在布里渊放大器的研究中, 多采用独立双池受激布里渊散射相位共轭镜, 并且可以通过改变延时线改变种子光与抽运光在放大池中的相遇时间, 对于长脉冲抽运池长又是相对很短的条件下, 斯托克斯种子光与抽运光在放大池中的相遇时间不同, 斯托克斯种子光经历的放大过程不同, 输出参数如参量提取效率和种子光放大率等也不同。所以在研究独立双池相位共轭镜时研究相遇时间对放大池的影响是很重要的。

本文利用瞬态包含抽运抽空的受激布里渊散射理论模型对布里渊放大器进行了数值模拟, 给出了布里渊放大中能量提取效率、斯托克斯种子光放大率、斯托克斯种子光脉宽压缩率和抽运光脉宽压缩率在几种不同的种子光和抽运光能量比下随不同相

遇时间的变化规律, 并在实验上进行了验证。

## 2 理论模拟

### 2.1 理论模型

受激布里渊散射可以用一个含时的、三维非线性偏微分方程组来描述。但就目前理论的发展水平直接对其进行解析求解是不可能的, 所以人们发展了近似方法和数值计算方法。当声子寿命比抽运脉冲宽度小很多时, 受激布里渊散射过程随时间变化不大, 这样可以近似认为抽运场、斯托克斯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。然而, 如果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受激布里渊散射瞬态理论。在受激布里渊散射放大池中, 由于激光场和斯托克斯场均是外加场, 所以理论上不必考虑初始噪声。在平面波近似及忽略二次时间导数情况下, 瞬态受激布里渊散射耦合波方程为

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \Gamma\right)Q = ig_2 A_L A_S^* \quad (1)$$

$$\left(\frac{n\partial}{c\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}\right)A_S = ig_2 A_L Q^* \quad (2)$$

$$\left(\frac{n\partial}{c\partial t} - \frac{\partial}{\partial z}\right)A_L = ig_2 A_S Q \quad (3)$$

其中  $A_L$ 、 $A_S$  分别为激光场和斯托克斯场振幅,  $Q$  为声波场振幅,  $\Gamma$  为受激布里渊散射线度,  $\Gamma = 1/(2\tau_p)$ ,  $\tau_p$  为声子寿命,  $c$  为真空中光速,  $m$  为受激布里渊散射介质的折射率,  $g_1$ 、 $g_2$  代表了光子-声子耦合常数,

$$g_1 = \gamma^e T_a^2 / (16\pi\omega), \quad g_2 = \gamma^e \omega_L / (4cn\rho_0),$$

\* 1999 年教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金、国家高技术惯性约束聚变主题和国家自然科学基金资助课题。

E-mail zhiweilu@yeah.net

收稿日期 2001-06-04; 收到修改稿日期 2001-08-20

$\gamma^e$  为电致伸缩耦合常数,  $T_a$  为热力学温度,  $\rho_0$  为介质平均密度,  $\omega_L$  为抽运场角频率,  $\omega$  为声子角频率。

率。从(1)式直接积分得到  $Q$ , 并把它代入其他两个方程, 并考虑介质的吸收得

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) A_S = \frac{g\Gamma}{2} A_L \int_0^t A_L^* A_S \exp[-\Gamma(t-\tau)] d\tau - \frac{1}{2} \alpha A_S, \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) A_L = \frac{g\Gamma}{2} A_S \int_0^t A_L A_S^* \exp[-\Gamma(t-\tau)] d\tau + \frac{1}{2} \alpha A_L, \quad (5)$$

其中  $\alpha$  为吸收系数, 光强  $I_L, I_S$  与  $A_L, A_S$  的关系为:

$$I_{L,S} = |A_{L,S}|^2.$$

在时间上使用隐式有限差分法, 在空间上使用向后差分格式对偏微分方程组(4)式和(5)式离散化和数值求解。在数值模拟中, 设入射抽运光和斯托克斯种子光的瞬态脉冲形状为高斯分布, 口径相同, 选取脉冲宽度  $t_p$  与实验值相同, 则高斯型抽运和斯托克斯种子光脉冲表达式为

$$A_{L,S}(t) = A_{L,S \max} \exp\{-2 \ln 2 [(t-t_0)/t_p]^2\},$$

$$I_{L,S} = dE_{L,S}/dt,$$

其中  $E_L, E_S$  分别为抽运光和斯托克斯种子光的能量。理论上同样选用  $\text{CCl}_4$  为受激布里渊散射介质, 其受激布里渊散射参数值由表 1 给出。

Table 1. Parameters of SBS-liquid

liquid	$n$	$\rho_0$ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\tau_p$ /ns	$\gamma^e$	$\nu$ / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\omega$ /MHz
$\text{CCl}_4$	1.452	1.595	0.6	1.35	1012	17417

## 2.2 理论模拟结果

我们定义相遇时间为抽运光峰值点与斯托克斯种子光峰值点相遇时, 相遇点与放大池后端面(抽运光入射面)距离对应的时间。能量提取效率  $\eta = (E - E_S)/E_P$ , 种子放大率  $k = E/E_S$ 。种子光脉宽压缩率  $\beta = T_S/T$ , 抽运光脉宽压缩率  $\gamma = T_P/T$ 。其中  $E, E_S, E_P$  分别为斯托克斯种子光提取抽运光能量后输出光的能量、斯托克斯种子光的能量和抽运光的能量。 $T, T_S, T_P$  分别为斯托克斯种子光提取抽运光能量后输出光的脉宽、斯托克斯种子光的脉宽和抽运光的脉宽。

图 1 给出了计算机模拟的布里渊放大中能量提取效率、种子光放大率、种子光脉宽压缩率和抽运光脉宽压缩率在不同的种子光与抽运光能量比的条件随相遇时间的变化规律。

从图 1 中可以看出, 对于给定种子光与抽运光

能量比, 种子光与抽运光在放大池中的不同位置相遇, 能量提取效率、种子光放大率、种子光脉宽压缩率和抽运光脉宽压缩率是不同的。相遇时间小于 4 ns 时, 能量提取效率和种子光放大率随相遇时间的增加而增加, 相遇时间大约为 4 ns 时, 达到最大值, 相遇时间再增加时, 能量提取效率和种子光放大率下降。而种子光与抽运光脉宽压缩率随相遇时间增加而增加。对于同一相遇时间, 随着种子光与抽运光能量比的增加, 能量提取效率增加, 种子光放大率降低, 种子光脉宽压缩率和抽运光脉宽压缩率降低。因为在布里渊放大器中, 当入射抽运光强达不到阈值时, 注入反向传播的斯托克斯种子光, 这样斯托克斯波、声波与入射激光场相互作用, 将导致激光能量向斯托克斯种子光转移。在斯托克斯种子光放大的过程中, 脉冲前沿由于增益饱和而上升很快, 因此, 在脉冲得到完全放大后, 抽运激光脉冲能量几乎全部转移到了一个很窄的后向脉冲中, 从而实现了脉冲压缩。对于同一种子光与抽运光能量比, 在相遇时间小于 4 ns 和大于 4 ns 时, 分别相应于抽运脉冲前沿及峰值附近部分和抽运脉冲后沿及峰值附近部分与斯托克斯种子脉冲相互作用, 而两光束的重叠程度决定了斯托克斯种子光提取抽运光的效率, 所以这时提取效率相对较低, 种子光放大率也较低。在相遇时间为 4 ns 左右时, 两光束基本上完全重叠, 所以提取效率较高。在相遇时间小于 4 ns 时, 斯托克斯种子与低能的抽运脉冲前沿相互作用, 导致了斯托克斯出射脉冲变宽。对于不同的种子光与抽运光能量比, 当种子光能量很小时, 有一部分抽运光没有被抽空, 随着种子光能量的增加, 抽运光有更大部分被抽空, 能量提取效率增加, 而这时由于抽运抽空所引起的增益饱和和效应越来越明显, 所以种子光放大率越来越小。在未抽空抽运时, 斯托克斯种子光很快就饱和了, 所以输出光脉宽较窄, 种子光脉宽和抽运光脉宽压缩率较高。

图 2 为实验结果的理论模拟。

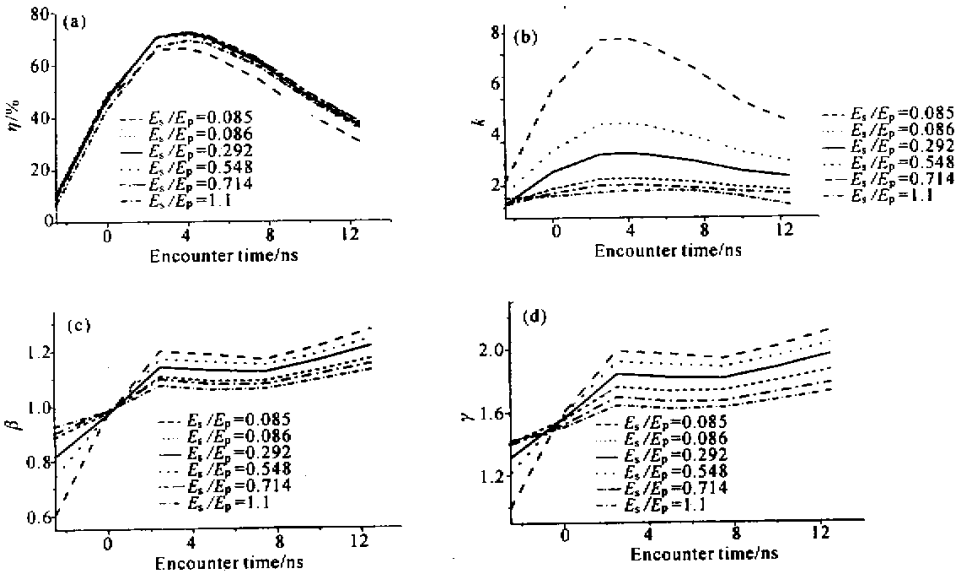


Fig. 1 Energy-extraction efficiency  $\eta$  (a), seed amplification factor  $k$  (b), seed beam pulse-width compression ratio  $\beta$  (c), pump beam pulse-width compression ratio  $\gamma$  (d) versus encounter time at different energy ratio of seed to pump.

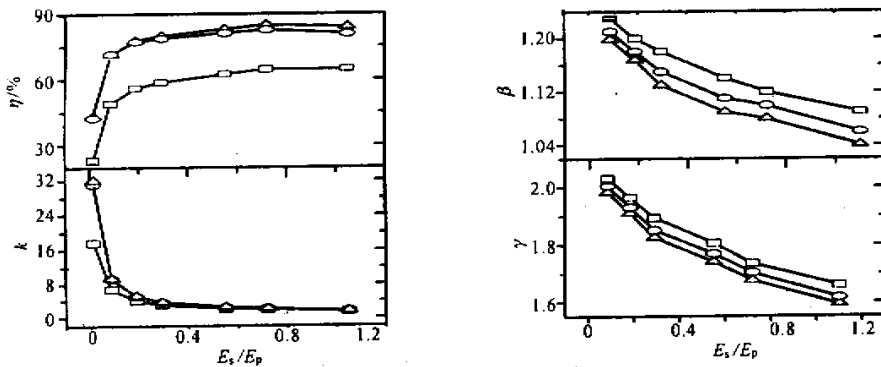


Fig. 2 Numerically predicted dependence of energy-extraction efficiency  $\eta$ , seed amplification factor  $k$ , seed beam pulse-width compression ratio  $\beta$ , pump beam pulse-width compression ratio  $\gamma$  on energy ratio of seed to pump

### 3 实 验

图 3 为实验光路。Nd:YAG 激光振荡器输出

的线偏振光经 Nd:YAG 激光放大器放大后输出脉宽为 8 ns~9 ns、能量为 90 mJ 的激光。望远扩束镜  $L_1$  和  $L_2$  的作用是扩束后可以更充分地利用 Nd:YAG 激光放大器中的介质。Nd:YAG 激光放大

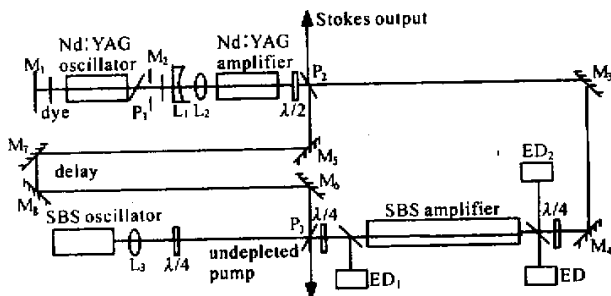


Fig. 3 Experimental setup

器出射的光经过  $\lambda/2$  波片入射到偏振片  $P_2$ ,  $\lambda/2$  波片的作用是调整种子与入射抽运光束的能量比。被偏振片  $P_2$  反射的 S 波经过由全反镜  $M_5$ 、 $M_6$ 、 $M_7$ 、 $M_8$  组成的延时线传到偏振片  $P_3$ , 通过调整延时线可以调整斯托克斯种子和抽运光在布里渊放大池中的相遇位置, 被偏振片  $P_3$  反射后经过一个  $\lambda/4$  波片被聚焦到受激布里渊散射种子产生池,  $\lambda/4$  波片的作用是使从产生池出射的斯托克斯种子光透过偏振片  $P_3$  并在入射到放大池以前变成圆偏振光。被偏振片  $P_2$  透射的光作为抽运光从放大池的另一端入射到放大池中。  $\lambda/4$  波片把入射到受激布里渊散射放大池的光变成圆偏振光。在放大池中, 种子光提取抽运光的能量后由偏振片  $P_2$  耦合输出, 未抽空的抽运光由偏振片  $P_3$  输出。

受激布里渊散射放大池的池长为 200 cm。入射到放大池的种子光和抽运光的能量  $E_S$  和  $E_P$  分别由能量计  $ED_1$ (ED200) 和  $ED_2$ (ED200) 探测, 斯托克斯种子光从放大器提取抽运光能量从放大器出射(本文称为斯托克斯出射光)后的能量  $E$  用能量计  $ED$ (ED200) 探测, 快响应光电二极管(响应时间约 1 ns)探测脉冲波形, 并由数字示波器 TDS684A 记录, 抽运光、斯托克斯种子光和斯托克斯出射光的平均脉宽分别记为  $T_P$ 、 $T_S$  和  $T$ 。

我们做实验的目的是验证理论。为了能更直观地验证理论的正确性, 实验中选择了三种种子光与抽运光的相遇时间, 即 10 ns、5 ns 和 2.5 ns。对于每一种相遇时间, 改变种子光与抽运光能量比、测量能量提取效率等参数。

实验中选取四氯化碳作为受激布里渊介质。斯托克斯种子光与抽运光的准直精度为 1 mrad。在测量前, 先阻止斯托克斯种子光入射到放大池, 只允许抽运光入射到放大池, 没有发现受激布里渊散射反射光。在实验中, 斯托克斯种子光、抽运光和斯托克斯出射光的能量和脉宽都是 30 次以上测量的平均值。

实验上测得的能量提取效率、种子光放大率、种子光脉宽压缩率和抽运光脉宽压缩率随种子光与抽运光能量比的变化规律曲线如图 4 所示。从图中可以看出相遇时间为 5 ns 时, 能量提取效率和种子光放大率最大, 种子光和抽运光脉宽压缩率最小, 相遇时间为 10 ns 时, 能量提取效率和种子光放大率最小, 但是种子光和抽运光脉宽压缩率最大。

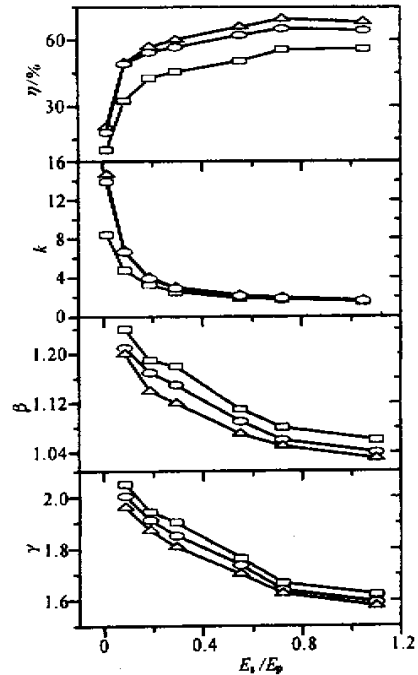


Fig.4 Experimentally measured dependence of energy-extraction efficiency  $\eta$ , seed amplification factor  $k$ , seed beam pulse-width compression ratio  $\beta$ , pump beam pulse-width compression ratio  $\gamma$  on energy ratio of seed to pump.  $\square$  10 ns,  $\triangle$  5 ns,  $\circ$  2.5 ns,

## 4 讨 论

为了理论与实验的比较更直接, 对所做的实验也做了相应的理论计算, 如图 2 所示。比较图 2 和图 4 可以看出, 与实验相同条件下计算机数值模拟的布里渊放大器系统中能量提取效率、种子光放大率、种子光脉宽压缩率和抽运光脉宽压缩率随种子光与抽运光能量比的变化规律, 其变化趋势与实验是一致的。对于固定的种子光与抽运光能量比, 当斯托克斯种子与抽运脉冲的峰值在放大池的中部相遇时, 能量提取效率和种子放大率最大, 但这时输出光的脉宽也最宽, 折中的选择是两束光在接近放大池的抽运光入射端相碰。种子光与抽运光的能量比最好是在 0.5 或者更低些, 因为这时能量提取效率和种子光放大率已经基本饱和, 并且随着能量比的增加, 提取效率增加缓慢, 脉宽压缩率下降。了解了以上的规律以后, 在设计双池受激布里渊散射相位共轭镜时就可以根据输出需要, 设计合适的延时线。

结论 本文从理论和实验上研究了布里渊放大中能量提取效率、斯托克斯种子光放大率、斯托克斯种子光脉宽压缩率和抽运光脉宽压缩率在几种不同的种子光和抽运光能量比下随相遇时间的变化规律。从研究中可以看出相遇时间是影响独立双池受激布里渊相位共轭镜输出的一个很重要的因素,我们的研究就是为独立双池相位共轭镜的应用奠定一些基础。

### 参 考 文 献

[ 1 ] Kmetik V , Fiedorowicz H , Andreev A A *et al.*. Reliable stimulated Brillouin scattering compression of Nd : YAG laser pulses with liquid fluorocarbon for long-time operation at 10 Hz. *Appl. Opt.* , 1998 , **37** ( 30 ) :7085~7090

- [ 2 ] Fedosejevs R , Offenberger A A. Subnanosecond pulse from a KrF pumped SF<sub>6</sub> Brillouin amplifier. *IEEE J. Quant. Electron.* , 1985 , **QE-21** ( 10 ) :1558~1562
- [ 3 ] Schiemann S , Ubachs W , Hogervorst W. Efficient temporal compression of coherent nanosecond pulses in a compact SBS generator-amplifier setup. *IEEE J. Quant. Electron.* , 1997 , **QE-33** ( 3 ) :358~366
- [ 4 ] Dane C B , Neuman W A , Hackel L A. High-energy SBS pulse compression. *IEEE J. Quant. Electron.* , 1994 , **QE-30** ( 8 ) :1907~1915
- [ 5 ] Ridley K D , Scott A M. High reflectivity phase conjugation using Brillouin preamplification. *Opt. Lett.* , 1990 , **15** ( 14 ) :777~779
- [ 6 ] Offenberger A A , Thompson D C , Fedosejevs R *et al.*. Experimental and modeling studies of a Brillouin amplifier. *IEEE J. Quant. Electron.* , 1993 , **QE-29** ( 1 ) :207~216

## Influence of Encounter Time on Brillouin Amplification

Ding Yingchun Lü Zhiwei He Weiming

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

( Received 4 June 2001 ; revised 20 August 2001 )

**Abstract :** Brillouin amplifier was numerically simulated by the theory model of transient stimulated Brillouin scattering including depleted pump. Energy extract efficiency. Stokes seed amplification factor and Stokes output pulse-width versus encounter time in the Brillouin amplifier were given. Three different encounter times were experimentally studied. The theoretical calculation was coincident with experimental results well.

**Key words :** Brillouin amplifier ; energy-extract efficiency ; encounter time