

种子光与抽运光能量比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)

(2001 年 12 月 23 日收到 2002 年 5 月 13 日收到修改稿)

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, 给出了布里渊放大器中能量提取效率、种子光放大率、种子光脉宽压缩率和抽运光脉宽压缩率随 Stokes 种子光与抽运光能量比的变化规律, 并用实验进行了验证, 理论与实验符合得较好.

关键词: 布里渊放大器, 提取效率, 种子光与抽运光能量比

PACC: 4265C, 4265F

1. 引 言

布里渊放大器是产生高质量相位共轭光和放大信号光的一种有效方案, 因为它能够承受高能量负载并且可以实现多脉冲合成, 所以人们已经从很多方面对布里渊放大器进行了研究^[1-5]. 在布里渊放大器中, 抽运光束从布里渊介质池的一端入射, 具有小光学频移的种子光从布里渊介质池的另一端入射, 如果种子光的频移等于布里渊频移, 则由这种频移引起的运动干涉模式在介质中能驱动一种声波, 使得光从抽运光散射到种子光, 导致了种子光的放大. 文献报道在布里渊放大器中的小信号区域, 种子光的放大率可达到 300 倍^[6]. 目前, 高功率激光在许多领域都有着重要应用, 因此, 研究高功率激光在布里渊放大器中的变化规律非常重要. 在布里渊放大过程中, 种子光与抽运光能量比是影响布里渊放大池中种子光放大的重要因素, 而且了解布里渊放大过程中的重要参数如能量提取效率和脉宽压缩等随种子光与抽运光能量比的变化规律对设计双池(特别是放大池)相位共轭镜具有重要意义.

本文数值求解了包含抽运抽空效应的瞬态受激布里渊散射耦合波方程, 给出了能量提取效率、Stokes 种子光放大率和 Stokes 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, 并用 Nd:YAG 激光器抽运的独立双池 SBS 相位共轭镜系统进行了实验验证, 理论与实验符合得较好.

2. 实 验

图 1 为实验光路. 平面全反镜 M_1 和未镀膜的玻璃平片 M_2 (反射率 8%) 构成 Nd:YAG 振荡器的振荡腔, 由染料片调 Q , 染料片的透过率为 18%. P_1 为起偏偏振片, 小孔光阑的直径为 0.2cm. 在 Nd:YAG 振荡器与放大器之间有一对望远扩束镜 L_1 和 L_2 , 扩束后可以更充分利用 Nd:YAG 放大器中的介质. Nd:YAG 放大器出射的抽运偏振光脉宽为 8—9ns, 能量为 90mJ. 经过 1/2 波片入射到偏振片 P_2 , 1/2 波片的作用是调整种子与入射光束的能量比. 被偏振片 P_2 反射的 S 波经过延时线传到偏振片 P_3 , 被偏振片 P_3 反射后, 经过 1/4 波片变成圆偏振光, 再经过透镜 L_3 聚焦到 SBS 种子产生池, 聚焦透镜的焦距为 10cm, 从种子产生池后向反射的 Stokes 光, 即种子光经过 1/4 波片后变成 P 波, 经过偏振片 P_3 透射, 再经 1/4 波片变成圆偏振光入射到 SBS 放大池. 被偏振片 P_2 透射的 P 波, 经过 1/4 波片变成圆偏振光入射到 SBS 放大池. 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

^{*} 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基金和国家自然科学基金(批准号 60088001)资助的课题.

抽运光由偏振片 P_3 输出. SBS 种子产生池和放大池的池长分别为 30 和 200cm. 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 ED1 (ED200) 和 ED2 (ED200) 探测, Stokes 种子光从放大

器提取抽运光能量从放大器出射(本文称为 Stokes 出射光)后的能量 E 用能量计 ED (ED200) 探测, 快响应 PIN 光二极管(响应时间约为 1ns)探测脉冲波形, 并由数字示波器 TDS684A 记录.

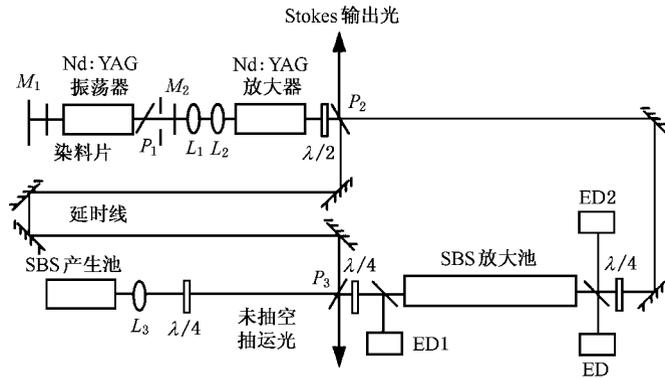


图 1 实验装置图

实验中选取四氯化碳作为受激布里渊介质,它具有短的声子寿命,约为 0.6ns,布里渊增益系数 $g = 6\text{cm/GW}$,在 $1\mu\text{m}$ 波长时光学吸收很小.对于不同的延时线,Stokes 种子光和抽运光在放大池中的不同位置相遇.对于有限长放大池,Stokes 种子光和抽运光在放大池中的相互作用时间越长,能量提取效率越大.选择一种延时线,使得 Stokes 种子光和抽运光的峰值在放大池中部相遇并相互作用.在实验中 Stokes 种子光和抽运光在放大池中的准直精度为 1mrad.在测量前,先阻止 Stokes 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 SBS 反射光.在实验中通过旋转 $1/2$ 波片,改变种子与抽运光的能量比率,抽运光能量从 77 降到 17mJ,种子光能量从 3 上升到 17mJ.

定义布里渊放大中的主要参量能量提取效率 $\eta = (E - E_s)/E_p$,种子光放大率 $\alpha = E/E_s$.种子光脉宽压缩率 $\beta = W_s/W$,抽运光脉宽压缩率 $\gamma = W_p/W$.其中 E_s, E_p, E 分别为 Stokes 种子光、抽运光和 Stokes 种子光提取抽运光能量后出射光(即 Stokes 出射光)的能量. W_s, W_p 和 W 分别为 Stokes 种子光、抽运光和 Stokes 出射光脉宽.

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 Stokes 种子与抽运光能量比的变化规律,如图 2 中的点所示.可

以看出,能量提取效率随种子光与抽运光能量比的增加而增加.在种子光与抽运光能量比较小时,能量提取效率增加很快;在种子光与抽运光能量比较大时,能量提取效率增加缓慢.种子光放大率、种子光和抽运光脉宽压缩率随种子光与抽运光能量比的增加而降低.在种子光与抽运光能量比较小时,种子光放大率、种子光和抽运光脉宽压缩率下降较快;在种子光与抽运光能量比较大时,种子光放大率、种子光和抽运光脉宽压缩率下降缓慢.

3. 理论模拟

3.1. 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,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.然而,如果声子寿命与抽运脉冲宽度具有大约相当的量级,则不能忽略光场振幅随时间的变化,这种情况下的理论研究称为 SBS 瞬态理论.在 SBS 放大池中,由于激光场和 Stokes 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^[7]

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \Gamma\right)Q = ig_1 A_L A_S^* \quad (1)$$

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

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

$A_{L,S}$ 分别为激光场和斯托克斯场振幅, Q 为声波场振幅, Γ 为布里渊散射线宽, $\Gamma = 1/(2\tau_p)$, $g_{1,2}$ 代表了光子-声子耦合常量, $g_1 = \frac{\gamma^e K^2}{16\pi\omega}$, $g_2 = \frac{\gamma^e \omega_L}{4cn\rho_0}$, γ^e 为电致伸缩耦合常量, K 为热力学温度, ω 为声子角

频率.从方程(1)中直接积分得到 Q ,并把它代入其他两个方程,并考虑介质的吸收得到

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

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

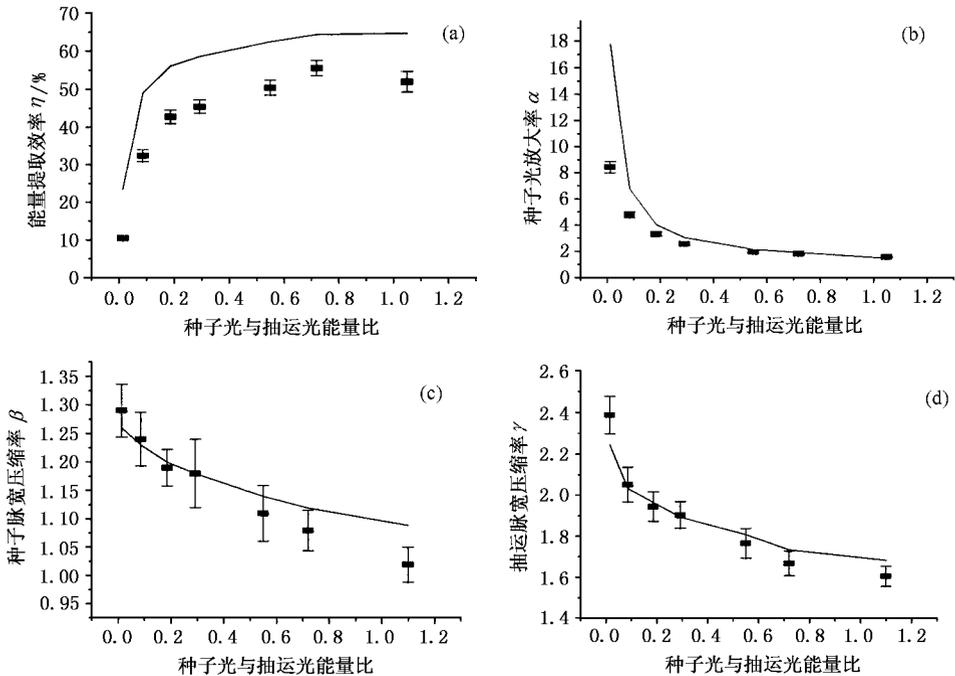


图2 “■”为能量提取效率 η 、种子光放大率 α 、种子光脉宽压缩率 β 和抽运光脉宽压缩率 γ 随种子光与抽运光能量比变化规律的实验点,实线为理论模拟曲线

在时间上使用隐式有限差分法,在空间上使用后向差分格式对偏微分方程组(4)和(5)离散化和数值求解.在数值模拟中,设入射抽运光和 Stokes 种子光的瞬态脉冲形状为高斯分布,口径相同.理论上同样选用 CCl_4 为 SBS 介质,其 SBS 参量值由表 1 给出^[8].

表 1 SBS 液体介质的参量

液体	n	$\rho_0/g \cdot cm^{-3}$	τ_p/ns	γ^e	$v/m \cdot s^{-1}$	ω/MHz
CCl_4	1.452	1.595	0.6	1.35	1012	17417

3.2. 理论模拟结果

图 2 中实线给出了与实验相同条件下计算机数值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随种子光与抽运光能量比的变化规律.

4. 讨 论

从图 2 中可以看出,理论模拟的值比实验值要

高一些,这主要原因可能是在理论模拟中没有考虑介质的吸收,理论模拟结果与实验结果的变化趋势是一致的.在布里渊放大池中的 Stokes 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.当种子光能量与抽运光能量相比很小时,有很大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.当种子光与抽运光能量比较大以后,提取效率增加缓慢,因为种子光把抽运光能量已经全部抽空了而引起了饱和效应.当种子光与抽运光能量比达到 1 时,这种饱和效应更明显了,能量提取效率增加的更少了.当 Stokes 种子光的能量与抽运光相比很小时,饱和效应不明显,种子放大率较大,随着 Stokes 种子光与抽运光能量比的增加,饱和效应越来越明显,种子放大率越来越小.当 Stokes 种子光的能量与

抽运光相比很小时,种子光与抽运光相互作用很快就会达到饱和输出,所以脉宽很小,随着种子光能量比的增加,抽运抽空越来越严重,输出脉宽越来越宽,种子光和抽运光脉宽压缩率下降.

5. 结 论

我们从理论和实验两方面研究了能量提取效率、种子光放大率、种子光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.在种子光与抽运光能量比较小时,能量提取效率随种子光与抽运光能量比的增加而增加很快,种子光放大率也下降很快,脉宽压缩率的下降的幅度也较大.当种子光与抽运光能量比较大时,能量提取效率增加缓慢,相应的种子光放大率和脉宽压缩率的降低的幅度较小.了解这一规律,可为设计和应用振放双池 SBS 相位共轭镜奠定基础.

- [1] Dane C B , Neuman W A and Lloyd A 1994 *IEEE . J. Quantum Electron.* **30** 1907
- [2] Schiemann S , Ubachs W and Hogervorst W E 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 358
- [3] Offenberger A A . , Thompson D C , Fedosejevs R , Santiago J and Manjunath H R 1993 *IEEE . J. Quantum Electron.* **29** 207
- [4] Scott A M , Watkins D E and Tapster P 1990 *J. Opt. Soc. Am. B*

7 929

- [5] Sun X D , Feng Y W , Jiang Y Y , Li Y and Zhou Z X 1998 *Acta Phys. Sin. (Overseas Edition)* **443**
- [6] Sternklar S , Jackel S , Chomsky D and A Z 1990 *Opt. Lett.* **15** 616
- [7] Boyd R W , Rzazewski K and Narum P 1990 *Phys. Rev.* **42** 5514
- [8] Erokhin A I , Kovalev V I and Faizullof F S 1986 *Sov. J. Quantum Electron.* **16** 827

The influence of the ratio of seed to pump energy on Brillouin amplification *

Ding Ying-Chun Lü Zhi-Wei He Wei-Ming

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

(Received 23 December 2001 ; revised manuscript received 13 May 2002)

Abstract

Brillouin amplifier was numerically simulated by using the theoretic model of transient stimulated Brillouin scattering. We have obtained the depleted pump energy extract efficiency , Stokes seed amplification factor , seed beam pulse-width compression ratio and pump beam pulse-width compression ratio versus the ratio of seed to pump energy. Experiment was done so as to verify the theory. The theoretical calculation was in good agreement with experimental results.

Keywords : Brillouin amplifier , energy-extract efficiency , ratio of seed to pump energy

PACC : 4265C , 4265F

* Project supported by the Trans-Century Training Program Foundation for the Talents from the Ministry of Education of China , by the National High-Technology Inertial Confinement Fusion Foundation of China and by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60088001).