

文章编号: 0253-2239(2004)02-168-4

抽运能量对受激布里渊散射光限幅特性的影响

吕月兰 吕志伟 何伟明 杨 珺

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 采用布里渊噪声起源模型, 数值模拟了受激布里渊散射介质 CCl_4 对波长 1064 nm 的 Nd:YAG 纳秒激光脉冲的传输特性及光限幅特性。入射抽运脉冲能量较低时, 非线性介质对纳秒激光脉冲呈光学透明。入射抽运脉冲能量高于受激布里渊散射产生阈值后, 透射脉冲峰值受限, 脉宽压缩, 能量趋于饱和, 说明该光学系统同时具有光功率限幅和能量限幅的光限幅特性。利用理论模型模拟了如下光限幅参量: 透射脉冲峰值功率、透射能量、能量透射率、脉宽压缩率依赖抽运光能量的变化关系。相应的理论模拟计算结果由实验进行验证, 实验结果与理论模拟相符合。

关键词: 非线性光学; 光限幅; 受激布里渊散射; 抽运能量

中图分类号: O437.2 文献标识码: A

Optical Limiting Characteristics Dependent on Pump Energy in Stimulated Brillouin Scattering Process

Lü Yuelan Lü Zhiwei He Weiming Yang Jun

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

(Received 23 September 2002; revised 25 March 2003)

Abstract: Adopting a noise-initiation mode of stimulated Brillouin scattering (SBS), optical limiting effect are numerically simulated by using 7 ns, 1064 nm, Nd:YAG laser pulses within CCl_4 liquid in SBS process. When the pump energies are low, the nonlinear medium can be optical transparent. When pump energies are higher than the threshold of stimulated Brillouin scattering, the peak powers of nanosecond laser pulses are limited, pulses are narrowed and the energies tend to saturated. This means the optical limiting has both power limiting and energy limiting characteristics. The relationships of optical limiting effect such as output peak power, output energy, transmissivity and pulse compression ratio versus pump energy are investigated by a theoretical model. The experimental results of above optical limiting effects were given. In authors' experimental regime, results were in good agreement with the conclusions predicted by theoretical simulations.

Key words: nonlinear optics; optical limiting; stimulated Brillouin scattering; pump energy

1 引 言

光限幅器具有保护光学敏感器件免受高功率激光损伤的功能。近年来, 人们研究了基于各种非线性效应的光限幅机制, 例如双光子吸收及多光子吸收光限幅^[1], 反饱和和吸收光限幅^[2,3], 非线性折射、反射、衍射光限幅^[4], 另外还有基于相变原理的光限幅^[5]等。受激布里渊散射作为一种非线性过程也具

有光限幅特性。本文从理论和实验两方面探讨了受激布里渊散射介质 CCl_4 对脉宽为 7 ns、波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 激光脉冲光限幅特性, 包括透射脉冲功率特性、能量特性、能量透射率和脉冲压缩率等光限幅参量依赖于抽运光能量的变化规律。掌握这些规律对于设计此种光限幅器件具有积极意义。

2 理论模拟

2.1 理论模型

采用 Alexander 等^[7]的受激布里渊散射噪声起

E-mail: luyuelan1968@163.com

收稿日期: 2002-09-23; 收到修改稿日期: 2003-03-25

源的数学模型来描述受激布里渊散射动力学过程，它可以归结为下面三个方程：

$$\left[\frac{n}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \right] E_1 = -\alpha E_1 + ik\rho E_s, \quad (1)$$

$$\left[\frac{n}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \right] E_s = \alpha E_s - ik\rho^* E_1, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\Gamma}{2} \rho = i\Delta E_1 E_s^*, \quad (3)$$

其中 $E_1(z, t)$, $E_s(z, t)$ 代表介质中的抽运光和斯托克斯光的振幅； α 代表介质的损耗系数； Γ 是受激布里渊散射线宽， $\Gamma = 1/(2\tau_p)$ ， τ_p 为声子寿命； n 是折射率； c 是光速； $\rho(z, t)$ 为介质密度； k, Δ 是布里渊光子-声子耦合系数； $k = \frac{\gamma^e \omega_c}{4cn\rho_0}$ ； $\Delta = \frac{\gamma^e K^2}{16\pi\omega}$ ；一般认为受激布里渊散射在池一端的噪声中建立起来，因此噪声强度作为斯托克斯光的边界条件，取噪声为输入抽运脉冲峰值功率的 10^{-12} 。

2.2 理论模拟结果

由于数值模拟计算中与光振幅直接相关的物理量是光强 $I_{1,s} = \frac{nc}{8\pi} |E_{1,s}|^2$ ，首先计算高斯光束传输过程中任意位置的光束截面

$$S_j = \pi\omega_0^2 [1 + (j \times \Delta z - Z_0)^2 / Z_r^2],$$

其中 $Z_r = \pi\omega_0^2 / \lambda$ ，

池长 $L=30$ cm，透镜焦距 $f=15$ cm，镜池间距 $Z_0=1$ cm，激光束腰半径 $\omega_0=0.05$ cm。引入上述参量数值求解耦合波方程组一维瞬态解^[8,9]，模拟出不同

抽运能量下发生受激布里渊散射时抽运脉冲及透射脉冲波形(图 1 所示)。

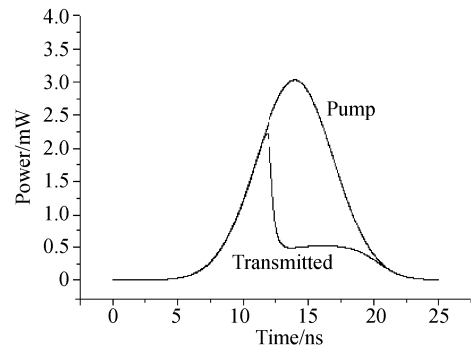


Fig. 1 Theoretical simulations of pump temporal and transmitted temporal profile for pump energy (40 mJ)

可以看出透射脉冲功率幅值明显低于抽运脉冲幅值，透射脉冲宽度也明显变窄，显示出功率限幅特性及脉宽压缩特性。随着抽运脉冲能量的不断增加，受激布里渊散射作用不断增强，后向散射的斯托克斯场将提取更多的抽运脉冲能量，导致透射脉冲峰值非线性降低，透射脉宽也不断变窄。对应不同的注入抽运脉冲峰值功率 P_{in} 脉宽 W_{in} 及抽运能量 E_{in} ，利用上述时间波形，可以得到经过介质中受激布里渊散射作用后透射脉冲的峰值功率 P_{tr} 和透射脉宽 W_{tr} ，进而通过对透射脉冲时间波形进行积分得到透射能量 E_{tr} ，并定义能量透射率 $T = E_{tr}/E_{in}$ ，脉宽压缩率 $R_s = W_{in}/W_{tr}$ ，然后给出上述四个光限幅参量随抽运光能量变化的理论曲线(图 2 实线)。

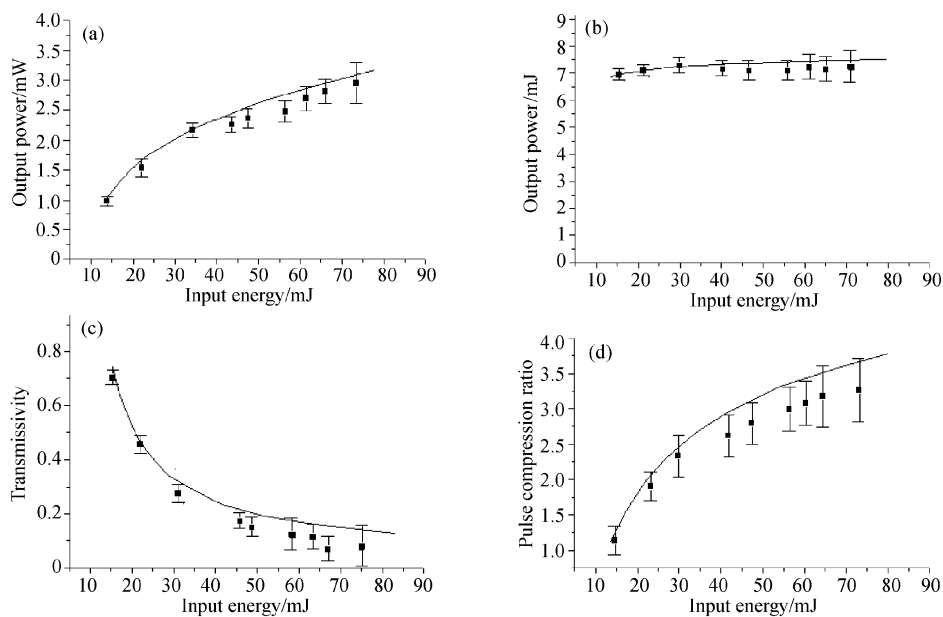


Fig. 2 Theoretical simulation of (a) output peak power, (b) output energy, (c) transmissivity, (d) pulse compression ratio vs pump energy (solid curves) and related experimental results (dots)

从图 2 可以看出,此光学系统具有光学限幅特性:透射脉冲峰值功率及透射能量随输入抽运光脉冲能量变化曲线可知:当入射的抽运光脉冲信号较弱时,透射脉冲峰值功率、透射能量随入射脉冲注入能量增加而线性增加,此时没有受激布里渊散射发生,光脉冲无损耗通过布里渊介质,透射率可高达 99%,介质此时是光学透明的;一旦注入抽运脉冲能量达到或超过介质受激布里渊散射阈值,透射脉冲峰值功率及透射能量的增加变得缓慢,并逐渐趋于饱和。图 2(d) 给出脉宽压缩率随抽运能量的变化规律,随着抽运脉冲能量的增加,压缩率单调上升,透射脉冲宽度不断变窄。

3 实 验

实验采用图 3 所示的实验装置。由全反镜和未

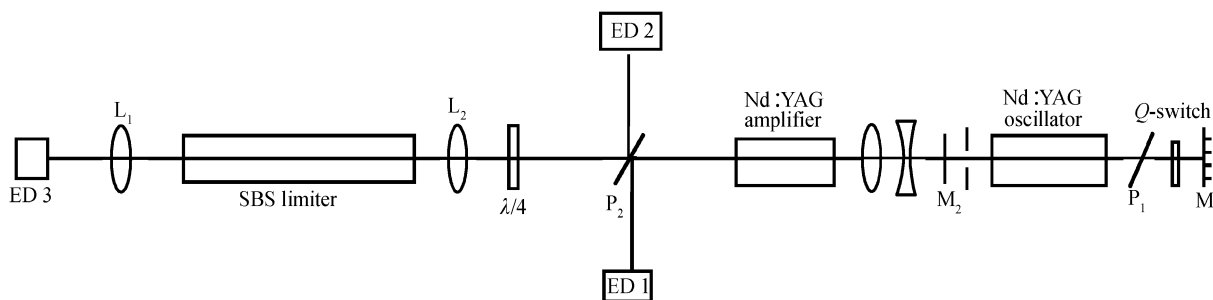


Fig. 3 Experimental setup. ED: energy detector

实验给出不同抽运能量(15~75 mJ)经过受激布里渊散射限幅器后透射脉冲的峰值功率、透射能量、能量透射率、脉宽压缩率随抽运光能量变化的结果(图 2 中实点)。实验变化规律表明:随着抽运能量的增加,透射峰值功率先是线性增加,当增加到有明显的受激布里渊散射产生时,透射峰值功率增加的速率开始变缓,并逐渐趋于饱和。对于能量从 15 mJ 到 75 mJ 变化的抽运光,光限幅后能量稳定在 $7.2 \text{ mJ} \pm 0.6 \text{ mJ}$ 的水平上,说明能量已进入饱和区,能量值已趋于饱和。这与相应理论模拟曲线给出的变化规律是一致的,可见此时能量限幅行为已接近理想。能量透射率、脉宽压缩率的变化趋势也与理论所预言的规律保持一致:透射率随抽运光能量的增加由 75% 下降到 9.3%,压缩率则随抽运光能量增加由 1.1 单调增加到 3.4。由图 2 的四个图可以看出:在抽运光能量较小时,理论与实验模拟曲线符合的很好,误差也较小;当抽运光能量变大时,实验测得的透射峰值功率、透射能量绝对量值低于理论计算值,而能量透射率、脉宽压缩率也明显偏离理论

镀膜的玻璃平片构成 Nd:YAG 激光器振荡级的谐振腔,偏振片 P_1 作为起偏器,以便从 Nd:YAG 振荡级获得偏振光输出。激光系统中加入小孔光阑以控制激光单模输出。

为了防止后向散射斯托克斯光脉冲进入激光系统,采用了偏振片 P_2 和波片组成的隔离器。抽运光输出能量 75 mJ,工作在 1064 nm,脉冲宽度为 7 ns,重复频率为 1 Hz。用衰减片来衰减抽运光的能量,以获得不同的抽运光能量输出。抽运光、后向散射斯托克斯光和透射光的能量 E_m 、 E_s 和 E_r 分别由能量计 ED1, ED2, ED3 探测,脉冲波形由快响应快速光电二极管探测,能量及波形均由数字示波器 TDS684A 记录。透射脉冲和入射抽运脉冲的平均脉宽分别记为 W_{tr} 和 W_{in} 。CCl₄ 介质的池长为 30 cm,聚焦透镜 F_1 、 F_2 选用 15 cm 焦距的薄透镜。

计算结果,同时测量误差也增大。造成这种偏差的原因是随着抽运能量的增加,其他非线性过程的将会参与竞争。实验中当抽运光能量较大时,我们观察到激光脉冲聚焦到 CCl₄ 池中时,发生一定程度的光学击穿,因而在抽运能量较大时理论与实验的偏差较大。

结论 本文从理论和实验两方面研究了基于受激布里渊散射的光限幅特性。当抽运激光能量低于受激布里渊散射阈值时,布里渊介质线性透射;当抽运激光能量超过受激布里渊散射阈值时,布里渊介质非线性透射,具有峰值功率受限和脉宽压缩特性。由于受激布里渊散射具有较高的阈值功率和很高的能量和功率负载能力,所以十分适合应用在高功率强激光的光限幅。

参 考 文 献

- Zhang Xueru, Yang Xuedong, Guo Fenyun. Elation of two-photon absorption optical limiting and optical wave polarization orientation in GaAs semiconductor. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(3):299~302 (in Chinese)

- 2 Kamanina NV. Reverse saturable absorption in fullerene-containing polyimides. Applicability of the Forster model. *Opt. Commun. J.*, 1999, **162**(4~6):228~232
- 3 Joseph W P, Kamjou M, Marder S R. Enhanced reverse saturable absorption and optical limiting in heavy-atom-substituted phthalocyanines. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(9):625~627
- 4 Khoo I C, Li H. Nonlinear optical propagation and self-limiting effect in lipid-crystalline fibers. *Appl. Phys. (B)*, 1994, **59**(6):573~570
- 5 Cha Zizhong, Wang Qi, Li Xuechun. Experimental study of response properties of VO₂ films to TEA CO₂ laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(8):1173~1176 (in Chinese)
- 6 Guang S, He Yuan Lixiang, Bhawalkar J D *et al.*. Optical limiting, pulse reshaping, and stabilization with a nonlinear absorptive fiber system. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(15):3387~3392
- 7 Alexander L G, Robert W B. Stochastic dynamics of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **44**(5):3205~3208
- 8 Lü Yuelan, Lü Zhiwei, He Weiming. Optical limiting of Nd:YAG nanosecond laser pulses by stimulated Brillouin scattering. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2003, **15**(5):427~430 (in Chinese)
- 9 Yang Jun, He Weiming, Lü Yuelan *et al.*. Enhancing SBS phase-conjugation fidelity by a special dual spectral-line pump. *Chin. J. Lasers* (中国激光), **30**(6):512~514 (in Chinese)