

非聚焦条件下 CS₂ 介质中受激布里渊散射 光限幅特性的研究*

龚华平 吕志伟[†] 林殿阳 刘松江

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

(2006 年 11 月 20 日收到, 2007 年 1 月 4 日收到修改稿)

采用布里渊噪声起源模型, 数值研究了非聚焦条件下 CS₂ 液体介质中脉冲传输的能量与功率特性. 结果表明, 在非聚焦条件下, 透射光的功率波形仍然表现出光限幅特性, 而透射能量随入射能量线性变化, 不具有限幅特性, 这一点与聚焦条件下的结果不同. 以波长 1053 nm、脉宽 20 ns 的 Nd:YLF 激光器为光源, 采用 3:1 的缩束系统, 通过衰减片调整入射光能量在 2 mJ—92 mJ 变化, 获得了透射光能量和功率波形随入射能量变化的规律, 并与聚焦条件下的结果进行了比较. 实验结果与理论模拟相符合. 由于聚焦条件下当入射能量较高时容易出现介质光学击穿, 所以采用缩束结构的功率限幅更适用于高功率大能量的情况.

关键词: 非线性光学, 受激布里渊散射, 光限幅, 非聚焦

PACC: 4265C, 4225B

1. 引 言

光限幅器由于具有保护光学敏感元件免受高功率强激光损伤的功能, 得到了广泛的研究. 人们研究了各种光限幅材料和光限幅机理, 例如双光子、三光子吸收^[1], 反饱和吸收^[2], 非线性折射、反射、衍射光限幅^[3,4]等等, 以及复合光限幅机理^[5]. 受激布里渊散射(SBS)作为一种非线性光学过程, 也具有光限幅的特性. 吕月兰等人研究了聚焦条件下激光脉冲在 CCl₄ 介质中的传输特性, 得到了透射光脉冲的能量和功率的变化规律, 结果表明 SBS 过程具有对功率及能量的光限幅特性^[6-9]. 由于聚焦结构的激光功率负载有限, 当入射激光功率较高时容易发生介质光学击穿现象^[10,11], 从而影响其实际应用, 而非聚焦结构可以承受较高的负载功率和能量, 所以有必要对非聚焦结构下的 SBS 光限幅特性进行研究. 本文采用 3:1 的缩束系统, 实验研究了非聚焦条件下 SBS 过程的光限幅特性, 得到了透射光能量和功率波形随入射能量变化的规律, 掌握这些规律对基于 SBS 的光限幅器的实际应用具有一定指导意义.

2. 理 论

SBS 光限幅的物理过程可以简单描述如下: 抽运光和 Stokes 光分别沿 z 轴并以相反的方向通过长度为 L 的布里渊介质池, 抽运光在 $z=0$ 处入射, $z=L$ 处离开介质池; Stokes 光沿 $z=L$ 到 $z=0$ 方向传播. 由于后向 SBS 的产生, 透射光的能量和功率就被限制了, 如图 1 所示.



图 1 基于受激布里渊散射的光限幅示意图

在缓变振幅近似条件下, 一维瞬态 SBS 的耦合波方程可写为如下的形式^[12]:

$$\left[\frac{n}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \right] A_p = -\alpha A_p + iK_0 \rho A_s, \quad (1)$$

$$\left[\frac{n}{c} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \right] A_s = \alpha A_s - iK_0^* \rho^* A_p, \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 10476009, 60478020)和哈尔滨工业大学优秀团体支持计划资助的课题.

[†] E-mail: zw_lu@sohu.com

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

其中 $A_p(z, t)$, $A_s(z, t)$ 代表介质中的抽运光和 Stokes 光的振幅, $i\alpha$ 代表介质的损耗系数, Γ 是布里渊散射线宽, $\Gamma = 1/(2\tau_p)$, τ_p 为介质声子寿命; n 是折射率; c 是光速; $i\alpha(z, t)$ 为介质密度; K, Δ 是布里渊光子-声子耦合系数: $K = \frac{\gamma^e \omega_p}{4cn\rho_0}$; $\Delta = \frac{\gamma^e T^2}{16\pi\omega}$; γ^e 是电致伸缩耦合常数, ρ_0 是介质的平均密度, ω_p 为抽运光频率, T 为介质温度, ω 为声子角频率. 一般认为 SBS 在池一端的噪声中建立起来, 因此噪声强度作为 Stokes 的边界条件, 取噪声为抽运脉冲峰值功率的 10^{-13} [13]. 假设抽运光脉冲在时间上是高斯分布的波形, 取为 $A_p(z=0, t) = \sqrt{P} \exp\{-4\ln 2(t-t_0)^2/t_p^2\}$, 其中 P 是抽运光峰值功率, t_0 是抽运光峰值对应的初始时间, t_p 是脉冲宽度. 这样 $A_p(z=0, t)$, $A_s(z=L, t)$ 就构成上述方程组的边界条件, 利用有限差分法即可对此方程组数值求解[14].

由于数值模拟计算用的是功率值, 所以使用关系式 $P = E/t_p$ 将入射能量值转换为功率值. 计算中介质参数与 CS_2 的实际参数一致, 介质池长 $L = 60$ cm. 抽运光参数取值如下, 波长 1053 nm, 脉宽 $t_p = 20$ ns, 能量 E 取值范围为 0—90 mJ, 引入上述参数数值求解耦合波方程组, 得到非聚焦情况下透射能量和透射率随入射能量的变化曲线(图 2 所示), 以及不同入射能量下的输出波形(图 3 所示). 从图 2 可以看出, 非聚焦条件下透射能量随入射能量的变

化基本上是线性的, 没有能量限幅的趋势, 这一点与聚焦条件下的结果不同[15]. 这是因为非聚焦情况下, 虽然有 SBS 产生, 但是其作用较弱, 导致能量受限的效果不明显. 从图 3 可以看出, 当入射能量小于阈值能量时, 透射脉冲几乎线性通过介质, 波形基本与入射波形一致. 当入射能量大于阈值能量后, 透射脉冲波形后沿出现限幅平台, 与聚焦条件下的数值模拟结果类似[6], 不同的是限幅平台的幅值稍高, 这也是由于 SBS 作用不强导致的结果.

3. 实 验

3.1. 实验装置

实验装置如图 4 所示, Nd:YLF 调 Q 激光器输出的激光经放大后最大能量 100 mJ, 脉冲宽度约 20 ns, 波长 1053 nm, 重复频率 1 Hz. 偏振片 P 和 1/4 波片组成隔离器, 防止后向受激布里渊散射光返回到 Nd:YLF 激光器. 缩束系统由焦距 30 cm 的凸透镜 L_1 和焦距 -10 cm 的凹透镜 L_2 组成, 缩束比为 3:1, 经过缩束系统后光斑大小约为 2 mm. 介质池长 60 cm, 采用液体介质 CS_2 为布里渊介质. 入射光和透射光的能量用能量计 ED200 探测, 脉冲波形用 PIN 光电二极管探测, 并由数字示波器 TDS3032B 记录. 通过衰减片调整入射光能量在 2 mJ—92 mJ 变化, 测量不同入射光能量下透射光的能量和波形. 对每个入射光能量, 其透射光能量都测量 15 次以上, 然后统计其平均值和标准差.

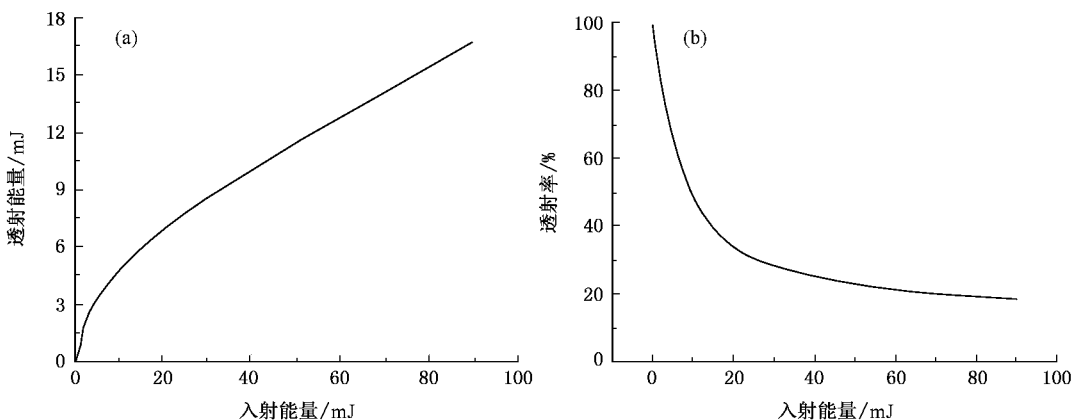


图 2 理论模拟非聚焦情况下的透射能量曲线(a)和透射率曲线(b)

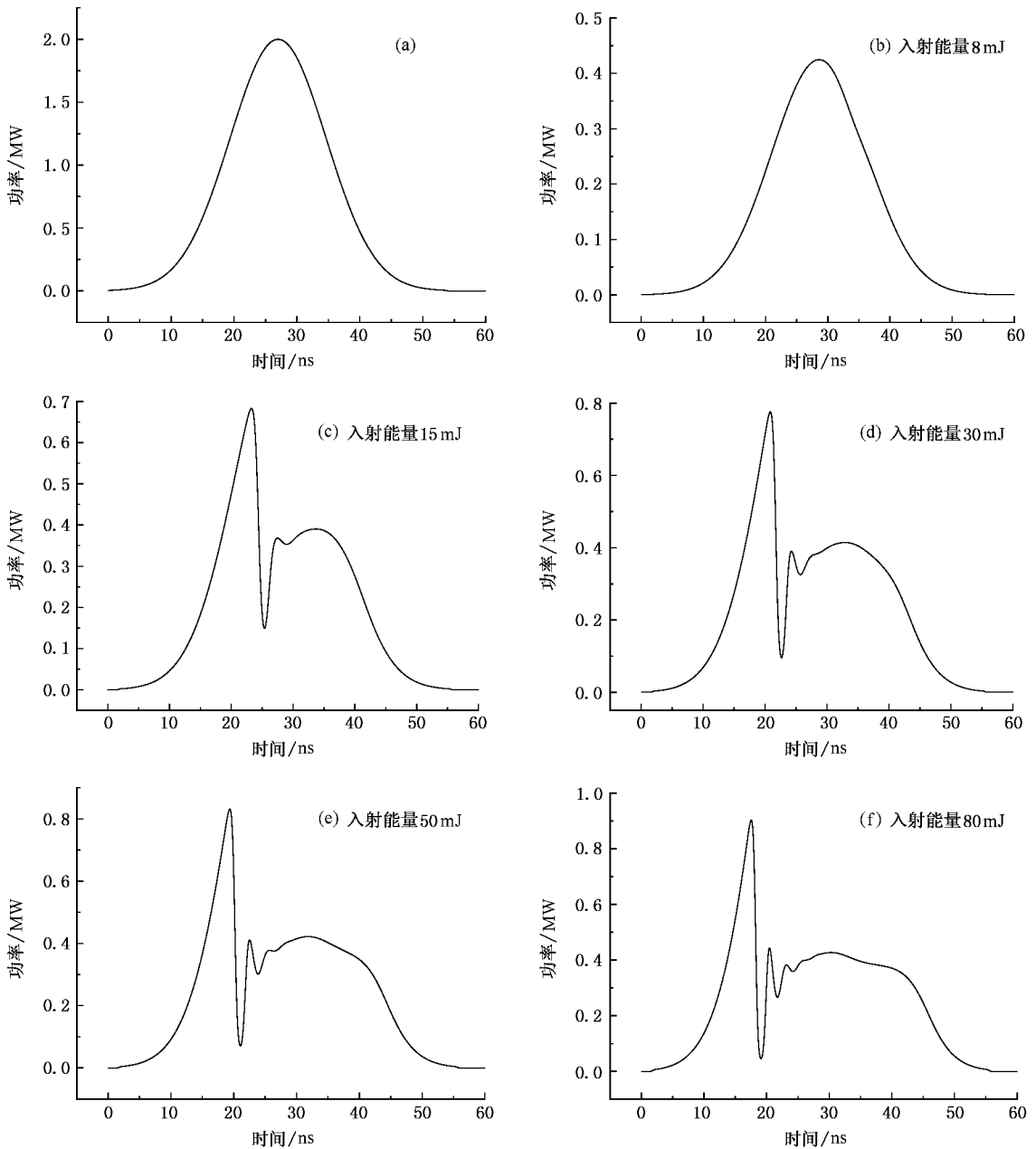


图3 入射波形 a 和非聚焦情况下不同入射能量的透射波形 (b)~(f)

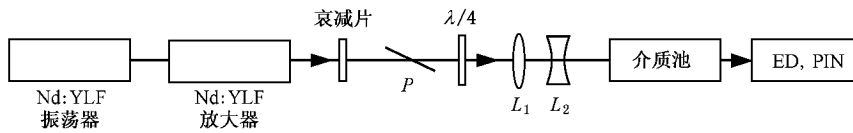


图4 实验装置(P 为偏振片, L_1 , L_2 为透镜,ED为能量计,PIN为光电探测器)

3.2. 实验结果及讨论

非聚焦条件下激光脉冲通过 CS₂ 介质的透射能

量和透射率如图 5 所示,其中聚焦条件下的实验值是将缩束系统替换为聚焦透镜测得.图中数据点为实验值,实线为拟合曲线.需要说明的是,聚焦条件

下当入射能量大于 50 mJ 时,CS₂ 介质中开始出现光学击穿现象,而非聚焦条件下入射能量为 92 mJ 时仍未出现光学击穿现象.从图 5 可以看出,非聚焦条件下透射能量随入射能量的变化基本上是线性的,没有能量限幅的趋势,而聚焦条件下明显显示出能量限幅特性.它们的透射率曲线相似,不同的是非聚

焦时透射率较高,而聚焦时透射率较低.这些实验结果与理论模拟基本一致.由实验结果还发现,非聚焦条件下透射能量的波动较大(定义标准差与平均值的比值为波动),最大波动达到 10%,而聚焦条件下仅为 5%.

非聚焦情况下激光脉冲通过CS₂ 介质的透射波

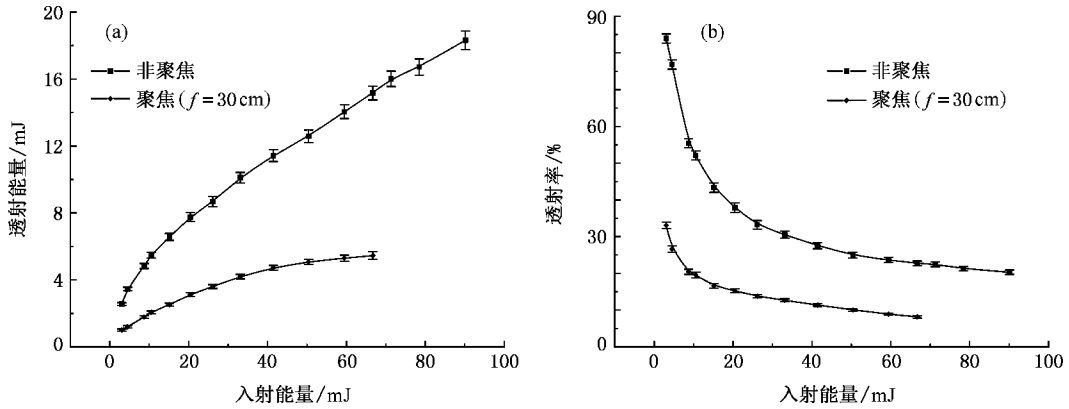


图 5 透射能量(a)和透射率(b)随入射能量的变化

形如图 6 所示.可以看出,在入射能量较小时(例如 8 mJ 的波形)透射光波形与入射光波形几乎一致;在入射能量较大时,透射波形的后沿出现限幅平台,表现出功率限幅特性.并且随着入射能量的增大,后沿限幅平台逐渐变高,宽度也逐渐变大.这是因为非聚焦条件下 SBS 的阈值能量提高了很多,在本实验

条件下的阈值能量约为 15 mJ.当入射能量为 8 mJ 时由于没有 SBS 产生,透射光波形与入射光波形基本一致;而当入射能量大于阈值能量时,由于 SBS 的产生,入射光能量逐渐转移给 Stokes 光,所以透射光波形后沿出现限幅平台,与文献 [6] 中聚焦条件下的实验结果类似,在此不再赘述.

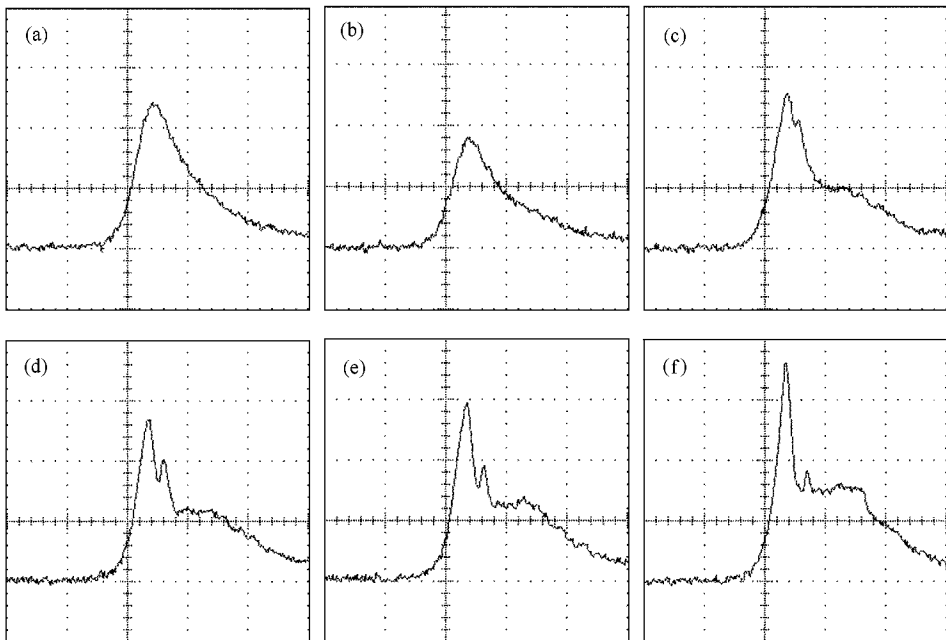


图 6 入射脉冲波形(a)和透射脉冲波形(b)-(f),分别对应入射能量 8,15,32,51,80 mJ 时间刻度 20 ns/div

4. 结 论

我们对非聚焦条件下 CS₂ 介质的受激布里渊散射光限幅特性进行了理论和实验研究,获得了透射光能量和功率波形随入射能量变化的规律,并与聚焦条件下的结果进行了比较.实验结果与理论模拟基本一致.结果表明,在非聚焦条件下,透射光的功率波形仍然表现出光限幅特性,与聚焦条件下的波

形类似,而透射能量随入射能量线性变化,不具有有限幅特性,这一点与聚焦条件下的结果不同.并且非聚焦条件下透射能量的波动较大,最大波动达到 10%,而聚焦条件下仅为 5%.但是由于聚焦条件下当入射能量较高时容易出现介质光学击穿,所以采用缩束结构的受激布里渊散射光限幅更适用于高功率大能量的情况.这些结果对受激布里渊散射光限幅的实际应用具有一定指导意义.

[1] He G S , Zheng Q D , Lu C G , Prasad P N 2005 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **41** 1037

[2] Duan Q , Xia H , Liu D J , Wang F , Toshifumi S , Toyoji K 2006 *Proc. SPIE* **6028** 602819

[3] Deng L G , Chen Y Y , Chen X 2006 *Proc. SPIE* **6028** 602822

[4] Sendhil Kaladevi , Vijayan C , Kothiyal M P 2006 *Optics & Laser Technology* **38** 512

[5] Aleksandr I R 2004 *Proc. SPIE* **5460** 179

[6] Lü Y L , Lü Z W , Dong Y K 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2170 (in Chinese) [吕月兰、吕志伟、董永康 2004 物理学报 **53** 2170]

[7] Lü Y L , Lü Z W , He W M 2004 *Acta Optica Sinica* **24** 168 (in Chinese) [吕月兰、吕志伟、何伟明 2004 光学学报 **24** 168]

[8] Lü Z W , Lü Y L , Yang J 2003 *Chin. Phys.* **12** 507

[9] Lü Y Lan , Dong Y K , Lü Z W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5247 (in Chinese) [吕月兰、董永康、吕志伟 2006 物理学报 **55** 5247]

[10] Hasi W L J , Lü Z W , He W M , Li Q , Ba D X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5654 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、何伟明、李强、巴德欣 2005 物理学报 **54** 5654]

[11] Hasi W L J , Lü Z W , Li Q , Ba D X , Zhang Y , He W M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5252 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、李强、巴德欣、张 祎、何伟明 2006 物理学报 **55** 5252]

[12] Alexander L G , Robert W B 1991 *Phys. Rev. A* **44** 3205

[13] Chen J 1999 *Optical phase conjugation and its applications* (Beijing : Science Press) p128 [陈 军 1999 光学位相共轭及其应用(北京:科学出版社)第 128 页]

[14] Lü Z W , Ding Y C , He W M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1286 (in Chinese) [吕志伟、丁迎春、何伟明 2002 物理学报 **51** 1286]

[15] Lü Y L , Lü Z W , He W M , Yang J 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 427 (in Chinese) [吕月兰、吕志伟、何伟明、杨 2003 强激光与粒子束 **15** 427]

Optical power limiting effect of stimulated Brillouin scattering in CS₂ media under non-focusing pump^{*}

Gong Hua-Ping Lü Zhi-Wei[†] Lin Dian-Yang Liu Song-Jiang
(*Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)
(Received 20 November 2006 ; revised manuscript received 4 January 2007)

Abstract

Adopting noise initiation model of stimulated Brillouin scattering (SBS), the characteristic of transmitted energy and power in CS₂ liquid media under non-focusing pump is investigated numerically. The results show that, the waveform of transmitted pulse with increasing input energy shows the characteristic of power limiting. And the transmitted energy varies linearly with input energy without the energy limiting effect. When 1053 nm 20 ns Nd:YLF laser was used as pump in a 3:1 inverse expansion system using attenuators to adjust input energy in the range of 2 to 92 mJ, the rules of transmitted energy and waveform versus input energy are acquired, and compared with the results of focusing pump. The experimental results are in good agreement with the theoretical simulations. Because the optical breakdown takes place at high input energy under focusing pump, the power limiting with non-focusing pump is applicable under the circumstances of high power and energy.

Keywords : nonlinear optics, stimulated Brillouin scattering, optical limiting, non-focusing

PACC : 4265C, 4225B

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 10476009, 60478020) and the Program of Excellent Team in Harbin Institute of Technology.

[†] E-mail : zw_lu@sohu.com